
東北大学
理学部の
研究力

<http://www.sci.tohoku.ac.jp/>



TOHOKU
UNIVERSITY

はじめに	1
数学専攻	
いろいろな空間における微分積分.....	2
物理学専攻	
超伝導体内の電流を光で操ることに成功	
究極の短パルスレーザー技術が拓くペタヘルツ電子テクノロジー	8
放射光でついに見えた磁気オクタポール～熱を電気に変える新たな担い手～	14
J-PARC ハドロン実験施設で奇妙な粒子と陽子の散乱現象を精密に測定	
原子核を作る力の解明に大きな前進.....	19
天文学専攻	
巨大ガス惑星の新たな形成モデルを提唱 太陽系外巨大惑星の落下問題解決と質量分布再現に成功	25
イベント・ホライズン・テレスコープ・プロジェクトが	
M87 ブラックホールごく近傍の磁場の画像化に成功	28
地球物理学専攻	
巨大地震発生箇所のプレート下に異常構造を発見一構造異常体が巨大地震の発生に影響一	31
金星大気中の自発的な波の励起を初めて再現	
ー地球シミュレータを用いた世界最高解像度のシミュレーションー	34
大地震によって誘発される火山噴火 火山噴火が誘発されるメカニズムと噴火発生頻度を提示	40
化学専攻	
新奇な電荷保持形態の観測～タンパク質における電子移動を司る新しい分子間相互作用～	43
蜂の巣格子に形成される多様な化学結合 パナジン酸マグネシウム：約半世紀来の謎を解明.....	46
脂質膜の曲率に応答する蛍光プローブ～細胞外小胞解析の新ツール～	49
地学専攻	
大阪北部地震前の大気中ラドン濃度の減少を検出～本震前の地震活動静穏化が原因～	52
模擬実験で隕石アミノ酸の同位体組成を再現ー小惑星有機物の主要生成反応のひとつが明らかにー	55
「はやぶさ2」初期分析チーム 2021年6月より試料の分析開始	58
生物学科／生命科学研究科	
海にすむ生物の複雑な関係性を捉える 緩い種間関係と種の多様性が生態系を安定化	63
植物が成長に合わせて葉の形状を変える仕組み～葉の形を決める遺伝子をイネで発見～	68



東北大学
理学部長・理学研究科長
寺田 眞浩

”Science (= 理学)”は「知りたい」や「面白い」といった純粋な探究心・好奇心に発する、「知の創造」をその本質に備えた学問分野です。理学部の使命は、先人達が明らかにしてきた「自然の理(ことわり)」を良く理解し、想像力とチャレンジ精神をもって「知の創造」を開拓することで人類共通の知的資産を生み出すとともに、その体系化を通じて未来へと継承することにあります。

しかしながら「知の創造」を開拓する道のりは決して容易ではありません。答えの用意されていない問いに果敢に挑戦し、先入観にとらわれることなく自由な発想のもとに答えを出していく過程は楽しくもありますが、思い描いた通りには進まずに悶々とした日々を過ごすことも少なくありません。「自然の理」を明らかにする研究は、知力はもちろんのこと、気概をも求められる険しい道でもあります。それだからこそ、その一端を解き明かしたときの達成感は格別です。大袈裟かもしれませんが、「自然界」を制覇した！と優越感に浸る一瞬でもあります。そう、残念ながら一瞬です。次なる壁が我々の挑戦を待っているからです。

答えの用意されていない問いに知力と気概をもって果敢に挑戦する者たちこそ、今まさに必要とされる人材像ではないでしょうか。全世界的な規模で感染症が拡大しており、ウイルスとの見えざる恐怖との戦いのもと、社会経済の崩壊を防がなければならないという、これまで経験したことのない大きな課題を人類は突き付けられています。理学研究を通して身に付けた知力と気概は間違いなくこうした先行きの不透明な時代を生き抜く力として、さらには時代を変える原動力として発揮されるものと信じています。

緑あふれる青葉山のキャンパスで、若き皆さんとともに新たな「知の創造」に向けた挑戦ができること、近い将来それらを通じて培った力が新たな時代の創造に向けて発揮されることをとても楽しみにしています。

いろいろな空間における微分積分

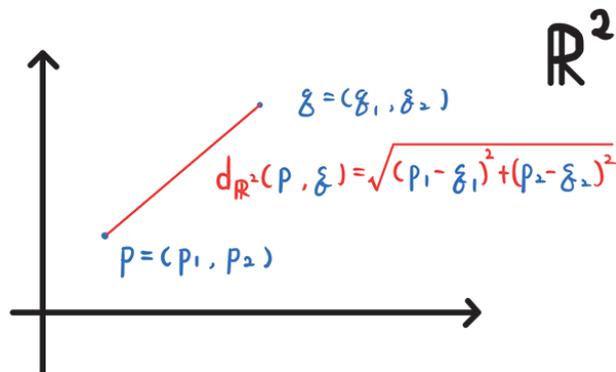
2021年1月24日 数学専攻 教授 本多 正平

概要

この文章は私の最近の研究成果を紹介することが目的です。以前理学部・理学研究科ホームページで書いた次の文章があります：

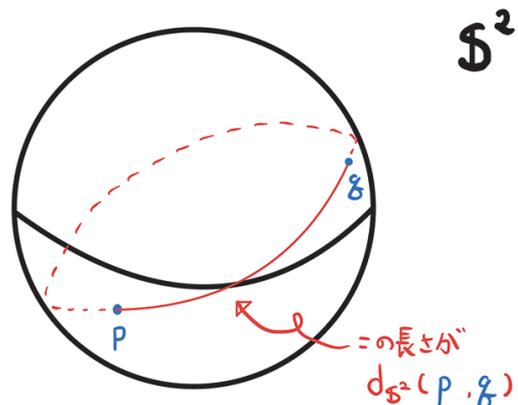
特異な空間上の微分方程式 ～空間と微分方程式を同時に動かす
<https://www.sci.tohoku.ac.jp/news/20171115-9397.html>

その続き(+α)の気持ちで書いてみたいと思います。



タイトルには2つの重要な用語があります。それは空間と微分積分です。そこでまずはこれらの用語の説明から始めたいと思います。まずは空間から。空間とは何でしょうか。この問いにはいくつかの答え方があります。ここでは、図形 X と、その上のどんな2点 p, q に対しても p と q の間の距離 $d_X(p, q)$ が定まっているような状況を指すこととしましょう。そのような空間 X を調べることを X の幾何学といいます。例えば平面 \mathbb{R}^2 を考えてみましょう。平面は2つの実数 x_1, x_2 を並べた (x_1, x_2) の集まりと思ってもらってOKです。平面は空間の例です。

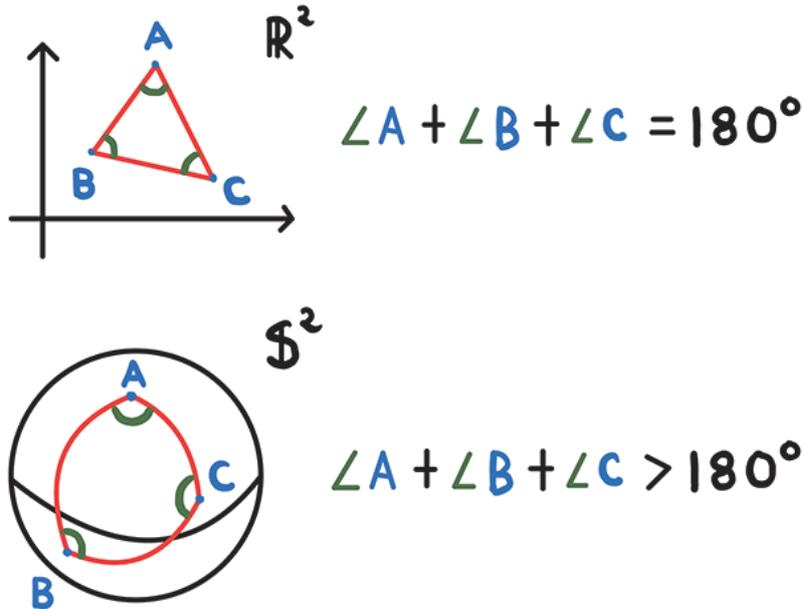
この平面 \mathbb{R}^2 の幾何学はユークリッド幾何学と呼ばれて、中学校でその初歩を学んだことがあるかと思います。これは字のごとく平らな空間であり、曲率が0の空間とも呼ばれます。ここで曲率という用語がでてきました。この曲率は後でもう少し詳しく説明を与えますが、ここでは三角形の内角の和と関係があるとだけ述べておくことにしましょう。



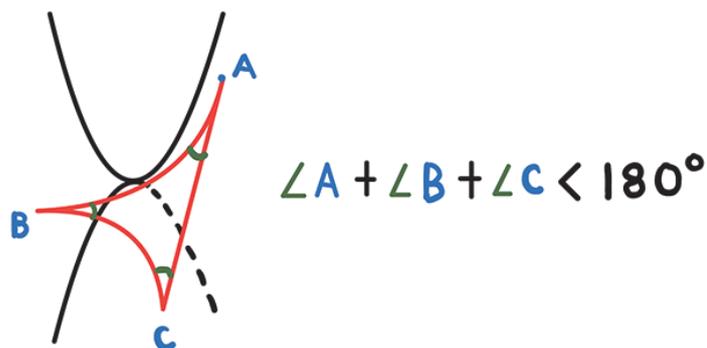
次に球面 S^2 を考えます。それは地球の表面と考えてOKです。この地球上の2点 p, q の間の距離 $d_{S^2}(p, q)$ は地球の大円(例えば赤道や、もしくは北極と南極を結ぶ自

然な弧の 1 つなど) の自然な一部の長さで与えられるとします。

この球面は直感的にも明らかなように、平らではありません。より正確には**曲率が正の空間**と呼ばれます。またここで**曲率**という言葉ができました。曲率が 0 とか正とか、いったいそれはどういうことを表現しているのでしょうか。先にも述べました通り、曲率を三角形の内角の和を使って説明しましょう。平面ではどんな三角形の内角の和も、もちろん 180 度になりますね。しかし球面だと実は 180 度より大きくなります。



実は考えている図形 M で、どんな(より正確には、小さい) 三角形を書いたとしても、その内角の和が 180 度となるとき**平坦**もしくは**0 曲率**といって、内角の和が 180 度より常に大きくなるなら**正曲率**といいます。そしてもちろん内角の和が 180 度より小さくなるときを**負曲率**と呼びます。負曲率の例はあげていませんでしたが、馬の鞍のような形がその例になります。



このような曲率の考え方は**断面曲率**と呼ばれるものになっています。私の研究ではそれより弱い、**リッチ曲率**と呼ばれる概念を主に扱っています。それは粗く言って、まず、いくつかの三角形をとり、それらの内角の和の相加平均をとって、それと 180 度を比べる概念です。このリッチ曲率は例えば相対論とも深い関係があることが知られています。

空間の説明はこれくらいにして、そろそろ微分積分の話題に移ってみましょう。微分積分という次の公式を思い出す方が多いかと思えます：

$$\int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a). \quad (0.1)$$

ここで $y = F(x)$ はその微分が $y = f(x)$ となる関数、すなわち $F'(x) = f(x)$ を満たす関数です。この公式(0.1)は微分積分学の基本定理とも呼ばれます。基本定理と呼ばれるだけあって、この公式が重要なことをご存じな方は多いでしょう。

実際これを使うと幾何学的な様々な量、円の面積や球の体積などを求めることができるようになります。例えば次の式(0.2)は半径が r の円の面積が πr^2 を表している公式になっています：

$$4 \int_0^r \sqrt{r^2 - x^2} dx = \pi r^2. \quad (0.2)$$

微分積分学の基本定理(0.1)を用いると、次の発散公式と呼ばれる公式が成り立つことがすぐにわかります：

$$\int_a^b f'(x)g'(x) dx = - \int_a^b f(x)g''(x) dx. \quad (0.3)$$

ただし $y = f(x)$ は $[a, b]$ の境界の周りでは 0 とします。この g'' は g を 2 度微分した関数で、 g のラプラシアンとも呼ばれ、 $\Delta g(x)$ とも書かれます。(0.3) も名前がついているだけあって、重要な公式として知られていて、物理的には電磁気学の言葉を使って説明を与えることもできます。数学的には $[a, b]$ の境界の周りでは 0 となっている関数に対する(0.1)の一般化とみなすこともできます。

ここで以上の式の見方を変えてみます。多くの方は(0.1)の左辺を

関数 $y = f(x)$ を a から b まで積分した数

と呼ぶでしょう。これを

関数 $y = f(x)$ を区間 $[a, b]$ で積分した数

と読み替えて、その読み替えの気持ちを汲んで

$$\int_{[a,b]} f(x) dx = \int_a^b f(x) dx \quad (0.4)$$

という(左辺の)記号 $\int_{[a,b]} f(x) dx$ を導入することにします。

ここまでは 1 次元の話でしたが、これを高次元化することができます。話を簡単にするために平面 \mathbb{R}^2 を考えましょう。ここで定義された関数 $y = f(x_1, x_2)$ を平面内の三角形 ΔABC 上で積分する：

$$\int_{\Delta ABC} f(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \quad (0.5)$$

ということは意味があって、**重積分**と呼ばれます（大学初年度で学びます）。この状況でも微分積分学の基本定理および発散定理は成り立ちます。ここではその後者を三角形と絡めて紹介することにしましょう。

関数 $y = f(x_1, x_2)$ が三角形 $\triangle ABC$ の境界(すなわち辺)の周りで 0 としたときに、次が成り立ちます：

$$\int_{\triangle ABC} \langle \nabla f, \nabla g \rangle (x_1, x_2) dx_1 dx_2 = - \int_{\triangle ABC} f(x_1, x_2) \Delta g(x_1, x_2) dx_1 dx_2. \quad (0.6)$$

ここで ∇f は f の **勾配ベクトル場** と呼ばれるもので、偏微分係数 $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ を単に並べて定義される、関数 $y = f(x_1, x_2)$ の 1 度目の微分を支配するベクトルのことです：

$$\nabla f(x) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n} \right). \quad (0.7)$$

また、それらの内積 $\langle \nabla f, \nabla g \rangle$ 、および g のラプラシアン Δg は次のようにして定義されます：

$$\langle \nabla f, \nabla g \rangle (x_1, x_2) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} (x_1, x_2) \cdot \frac{\partial g}{\partial x_i} (x_1, x_2), \quad \Delta g(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 g}{\partial x_i^2} (x_1, x_2). \quad (0.8)$$

ここで、関数 $y = g(x_1, x_2)$ の 2 度目の微分を支配する行列、**ヘッシアン**：

$$\left(\frac{\partial^2 g}{\partial x_i \partial x_j} \right)_{ij} \quad (0.9)$$

の対角成分の和(**トレース**といいます)が g のラプラシアンに他ならないことを注意しておきます。

このような微分積分学の基本定理および発散公式は平面 \mathbb{R}^2 に限らず、高次元の、曲がった、角のない空間 M^n でも同様に成り立つことが知られています。ここで n はその空間の**次元**を表していて、そのような空間 M^n を調べることを**リーマン幾何学**といいます。平面がその典型例であったことを思い出すと、ユークリッド幾何学はリーマン幾何学の一部とみなせることとなります。

空間 M^n における微分積分学の基本定理および発散公式のよく知られた証明方法は、 ∇g を考えている空間の上の風だと思って、その風に乗ってその空間上を移動することを考えるものです。ここでもやはり g のラプラシアン Δg とは g のヘッシアンのトレースとして定義されるものです。

私はリーマン幾何学を超えて、角があるかもしれない空間 X 上の微分積分を通して X を調べるという幾何学をやっています。

空間 X で微分積分を行うという意味をはっきりさせておきましょう。まずその空間 X を測る測り方 m (正確には**測度**と呼ばれます) を 1 つ固定します。そして、その測り方 m に沿って X 上の関数 $y = f(x)$ を積分することを考えます：

$$\int_X f(x) \, dm(x). \tag{0.10}$$

これは実際に可能で、**測度論**と呼ばれる分野がそれを可能にしてくれます。粗く述べますと、測度 m とは、曲線 c に対するその長さ $L(c)$ 、曲面 S に対するその面積 $A(S)$ 、立体 P に対するその体積 $V(P)$ といった概念の一般化にあたるものです。

考えている空間に応じて自然な測度があります。例えば線分を考えるとき、その大きさを測る自然な測り方は間違いなく**長さ**でしょう。これは1次元的な測り方と言えます。他にも、球面を考えるときには、その大きさを測る自然な方法は**面積**ですね。これは2次元的な測り方と言えます。

もちろん「線分の面積は？」と問うこともできますが、その答えは0になります。すなわち意味のある数がでてこなくなり、これは線分という1次元の図形に対して面積という2次元的な測り方は自然ではない、ということの意味しています。同様に、「球面の長さは？」と問うと、その答えは無量大になります。これも2次元の球面に対しては長さという1次元的な測り方は自然ではないことを意味しています。小学校、中学校、高校でこのような問いがまずなされてこない理由は、人は無意識に図形を自然な方法で測ってしまうからともいえるかもしれません。

この状況でも微分積分学の基本定理および発散公式

$$\int_X \langle \nabla f, \nabla g \rangle(x) \, dm(x) = - \int_X f(x) \Delta g(x) \, dm(x) \tag{0.11}$$

がいつ成り立つのか、という問いには意味があります。すなわち「微分積分の重要な公式はどんな空間にまで一般化されるのか」を問うということです。ここでラプラシアン Δg はやはりヘッシアンのトレースとして理解します。イタリアの数学者のグループは(0.11)が成り立つことと、測度 m が自然なものであることは同値であろうと予想しました([DePhG18; <https://arxiv.org/abs/2110.02420>]). そしてこの予想を解決したことが私の最近の研究成果です([BGHZ21; https://jep.centre-mersenne.org/item/JEP_2018__5__613_0/, H20; <https://projecteuclid.org/journals/geometry-and-topology/volume-24/issue-4/New-differential-operator-and-noncollapsed-mathrmRCD-spaces/10.2140/gt.2020.24.2127.short>]).

その証明はこれまでにない方法でなされました。それは**熱方程式**とよばれる次の偏微分方程式を用いるものです：

$$\frac{d}{dt} h_t f = \Delta h_t f. \tag{0.12}$$

考えている空間 X を燃やすとその図形は灰になって燃え尽きますが、その燃え尽き方を支配する方程式が熱方程式です(上のリンクも参考にいただければ幸いです)。

この熱方程式は先に紹介しましたリッチ曲率をみることでコントロールすることができることがわかっています。また、逆に熱方程式をみるとリッチ曲率もわかる、ということも知られています。この熱方程式とリッチ曲率の関係は、 X

上で物をうまく運ぶ方法を記述する理論、**最適輸送理論**，を介して発見されました。すなわち熱は空間の曲がり方を知っていて、曲がり方も熱を知っている、とも言えます。この熱方程式をリッチ曲率のコントロールとともに使って、考えている空間 X を無限次元の 0 曲率の空間に埋め込んで、平坦な空間の幾何学と X の幾何学を比較することで予想を証明することができました。風に乗って移動することで重要な公式の証明がなされていたことを思い出すと、これは驚きの証明であったといえます。

その証明における決定的なアイデアを紹介するには(もうすでに結構な文章を書いていて恐縮ですが) 残りのスペースは短すぎます。ですが実は本年度の理学部パンフレット (https://www.sci.tohoku.ac.jp/about/pdf/sci_annai2022.pdf) の表紙の黒板に一番大事な計算の部分がさりげなく書かれていますので、ご興味を持たれた方はご覧になっていただければ幸いです：



東北大学理学部案内 2022

今後も熱方程式を使って幾何学および解析学にまたがる数学の分野を行き来しつつ、研究を進めていきたいと思っています。

References

- [BGHZ21; https://jep.centre-mersenne.org/item/JEP_2018__5__613_0/] C. Brena, N. Gigli, S. Honda, X. Zhu: Weakly non-collapsed RCD spaces are strongly non-collapsed, arXiv:2110.02420.
- [DePhG18; <https://arxiv.org/abs/2110.02420>] G. De Philippis, N. Gigli: Non-collapsed spaces with Ricci curvature bounded below, Journal de l'École polytechnique, 5 (2018), 613-650.
- [H20; <https://projecteuclid.org/journals/geometry-and-topology/volume-24/issue-4/New-differential-operator-and-noncollapsed-mathrmRCD-spaces/10.2140/gt.2020.24.2127.short>] S. Honda: New differential operators and non-collapsed RCD spaces Geom. Topol. 24 (2020), no. 4, 2127-2148.

超伝導体内の電流を光で操ることに成功

究極の短パルスレーザー技術が拓くペタヘルツ電子テクノロジー

2021年9月22日 物理学専攻 教授 岩井 伸一郎

発表のポイント

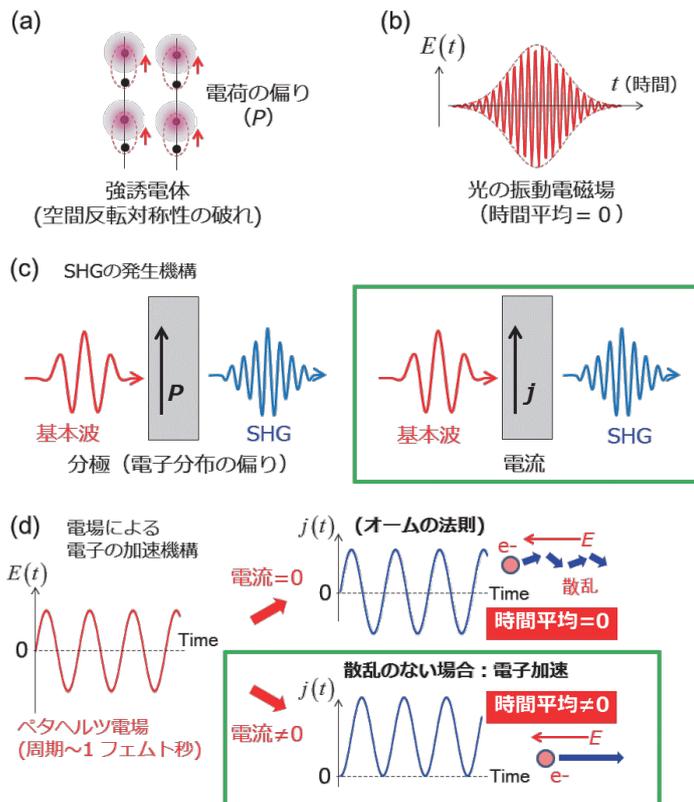
- 物質中に方向の定まった正味の（平均してもゼロにならない）電流を振動電場である光電場によって流すことはできなかった。
- 超短パルス光の位相制御技術を用いて、超伝導体中に方向の決まった電流を発生させることに成功した（オームの法則に従わない物質中の電子の加速を実現）。
- 銅酸化物や鉄ヒ素化合物などの高温超伝導体^(注1)への展開により、室温近傍で現在の1万倍の超高周波（ペタヘルツ）電子回路の可能性が拓かれる。

概要

ペタ（千兆）ヘルツの超高周波電場である光は、現在のギガ（10億）ヘルツ駆動エレクトロニクスを飛躍的に高速化（高周波化）するポテンシャルを秘めています。しかし、振動電場である光によって、電子回路の基本動作である電流を一方向へ流すこと（電子を動かす方向を決めること）はできませんでした。東北大学大学院理学研究科の岩井伸一郎教授、川上洋平助教らのグループは、有機超伝導体^(注2)に極めて時間幅の短い光パルスを照射した瞬間、向きの定まった電流が生じることを発見しました。この結果は、オームの法則に従わない電子の加速が超伝導体中で起きていることを示します。今後、銅酸化物や鉄ヒ素化合物などの高温超伝導の機構解明や、ペタヘルツデバイスへの応用に役立つことが期待されます。この成果は英国科学雑誌「*Nature Communications*」に2020年8月18日午後6時（日本時間）にオンライン掲載されました。

図1(a)「対称性の破れ」の例。
強誘電体 電荷分布に偏りがある。

図1(b) 光の電場振動波形
図1(c) SHGの発生機構
左 電子分布の偏り（分極）
右 電流→本研究におけるSHGの原理
図1(d) 電場による電子の加速（電流の生成）
機構
左 電場波形、右上 オームの法則による電流
右下 散乱の無い電子加速による電流→本研究における光電流の原理



研究の背景

物質に「向き」が生じることを物理学では「対称性の破れ」と呼んでいます。この対称性の破れは強誘電体、強磁性体、超伝導体などあらゆる物質の電気・磁氣的性質を特徴付ける概念です(図1(a))。しかし、光によってそれを観測、操作する仕組みは単純ではありません。その理由は、光の振動電場が図1(b)に示すように対称的な波形を持っている(平均すれば電場がゼロになる)ためです。第二高調波発生(SHG: Second harmonic generation、レーザー光などの強い光を物質に照射した際に起こる波長変換)が、物質中の電子分布の偏り(=P[図1(c)左])や電流(=j[図1(c)右])などの、「向き」がなければ起きないことが知られていますが、それも同じ理由によります。この「常識」は、よく知られるオームの法則 $j(t)=\sigma E(t)$ (j :電流、 σ :電気伝導度、 E :電場)に電子の運動が従うことを前提にしています。(図1(d)右上)。オームの法則は、電子が数多くの散乱(損失)を経るために電流が電場に比例するプロセスを記述するものです。もし散乱がなければオームの法則は成り立たず、電子は図1(d)の右下に示すように、光電場による加速を受けます。注目すべきことに、この無散乱状態における電子の加速運動は、電場の時間平均がゼロであっても正味の電流を生じます。つまりこのメカニズムによって、光によって電流の向きを決めることができます。しかし、物質中の電子の散乱時間はとても短く(およそ4~40 フェムト秒、1フェムト秒は1000兆分の1秒)、その間に電子を加速することは極めて困難と言われてきました。

研究の内容

・有機超伝導体からの SHG

本研究では、パルス幅およそ6フェムト秒(通信波長帯の近赤外光では電場振動の1周期に対応する時間)の極限的な短パルス光を用いることによって、散乱のない電子の加速、つまり、光による向きの定まった電流の発生に挑戦しました。

$[\kappa\text{-(BEDT-TTF)}_2\text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2]\text{Br}]$ は、よく知られた有機分子の層状構造からなる有機超伝導体です。この物質には「向き」、つまり対称性の破れはありません。6フェムト秒の近赤外光を照射すると、入射光(基本波)のエネルギー(0.75 eV=1653 nm)の2倍の光子エネルギーに第二高調波発生(SHG、図2(a)の赤線)が観測されます(青線は第3高調波(THG: Third harmonic generation))。しかし、この物質には「対称性の破れ」はないので、SHGなどの偶数次の高調波は本来発生しないはずですが。有機物質では電子の散乱時間は40フェムト秒程度であり、電場の印加時間(=パルス幅6フェムト秒)の方が短いことを考えれば、電子が散乱なく加速され(一方向に電流が流れ)、SHGが生じた可能性があります。

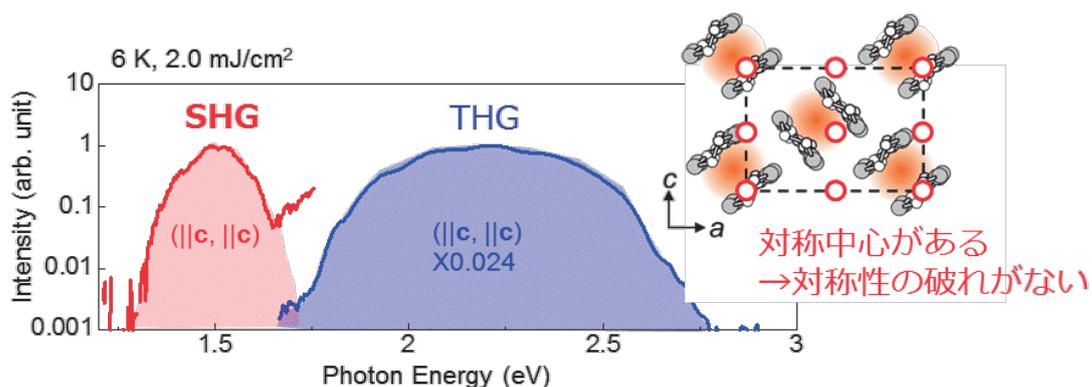


図2 有機超伝導体 κ -(BEDT-TTF)₂Cu[N(CN)₂]Br に 6 fs パルス光を照射して得られた SHG と THG (x0.024) のスペクトル。基本波、SHG、THG のいずれの偏光も c 軸に平行

・光の電場波形の制御による電流駆動メカニズムの検証

この散乱の無い電子加速による電流は、電場波形の変化に極めて敏感です。本研究では、光の振動の1サイクルよりもはるかに短い時間精度 (~100 アト秒、1 アト秒は 100 京分の一秒) で光の電場波形を制御する技術 キャリアエンベロープ位相 (Carrier Envelope Phase (以下、CEP) の操作) を用いて、上記の特徴を検証しました。CEP 操作は、光周波数コム^(注3) (2005 年ノーベル物理学賞) とも関係する先端光技術です。図 3(a)に示すように、光のパルス波形を特徴付ける包絡線 (黒点線) の内部における、電場振動の位相 (時間軸に対するずれ) が CEP です。図 3(a)に示すように CEP を光の振動周期 (~5 フェムト秒) の半周期分変化させることによって、絶対値が最大の時の電場の符号を正から負へ変えることができます。図 3(b)は、電子加速による電流の時間波形の模式図です。CEP が赤から (緑を経て) 青まで半周期変化すると、電流の向きが正から負へ変化していることがわかります (CEP が 1 周期変化すると、2 回反転します)。

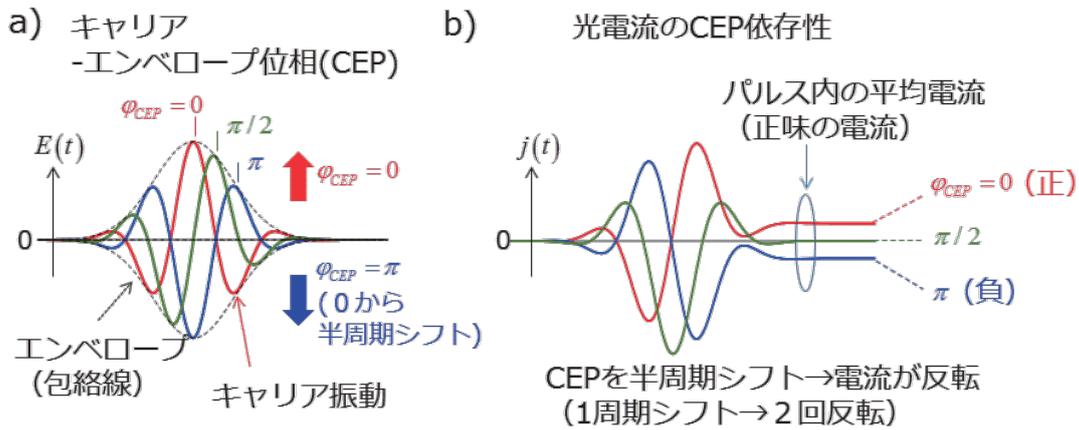


図 3 (a) 単一サイクル光電場のキャリアエンベロープ位相 CEP の模式図。キャリア振動の極大とエンベロープ(包絡線)の極大頂点が一致している場合をゼロにとっている (赤線)。(b) 無散乱の電子加速による電流の時間プロファイルの CEP 依存性。

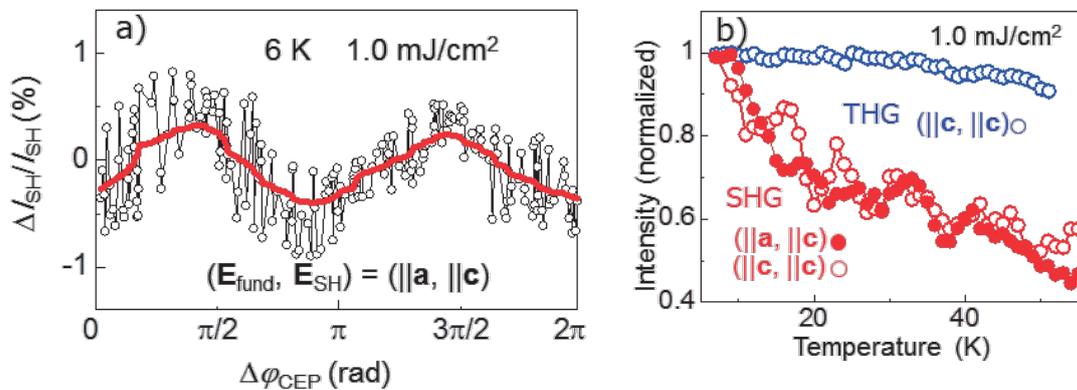


図 4 (a) SHG の CEP 依存性 (b) SHG の温度依存性

実際に、有機超伝導体において CEP を変化させて SHG の強度を測定すると、図 4(a)のように CEP が 1 周期変化する間に SHG は 2 周期の変化を示します。図 3(b)に示すように、CEP が半周期変化すると電流の向きが反転 (CEP 一周期で 2 回反転) することに対応しています。これは、電流が反転しても絶対値が同じなら SHG の強度は等しいので、2 周期の変化になるためです。このような SHG の CEP 依存性は、SHG が散乱のない電子の加速による電流を起源としていることの証拠と言えます。

・超伝導ゆらぎとの関係

(図 1 の説明によれば) 散乱のない電子加速機構によって生じる電流の舞台は、必ずしも超伝導体である必要はありません。しかし、観測された SHG は、超伝導転移温度 (11.5 K) に向かって、高温側から低温側へ異常増大しています (図 4(b))。このことは無散乱電子加速による電流の発生には、超伝導が大きく関わっていることを示しています。図 4(b)は、超伝導転移温度よりも高温 (30 K 以上) から SHG が増大を開始することを示しています。図 5 の温度-圧力相図に示すように、多くの超伝導体では、超伝導転移温度以上において超伝導ゆらぎ^(注4)と呼ばれるクーパー対の短距離相関を反映した状態が注目されています。このマイクロな超伝導の種とも言える状態は、超伝導の微視的機構の解明だけでなく、サブナノメートルサイズにおける低損失回路への応用も期待されています。今回我々が観測した光電流は、単に散乱時間内の電子加速というだけでなく、超伝導揺らぎが重要な役割を果たしていることを示しています。

・まとめと波及効果

本研究では、通信波長帯 (近赤外光) における単一サイクルパルスのキャリアエンベロープ位相 (CEP) 操作という最先端光技術を駆使し、散乱 (損失) の無い電子の加速による電流を観測しました。また、この電流発生機構が超伝導ゆらぎに関係していることを明らかにしました。さらに我々が注目しているのは、図 1(d)や図 3(b)に示したように、SHG として観測した微視的な電流はフェムト秒周期で振動している「ペタヘルツ電流」です。光によるペタヘルツ電流の発生技術は、現在ギガ (10 億) ヘルツのエレクトロニクスの駆動速度を、100 万倍のペタ (1000 兆) ヘルツへと飛躍的に高周波化する可能性を秘めています。また、今回用いた有機物質では、超伝導ゆらぎは 50 K 以下に制限されますが、銅酸化物などの高温超伝導体を用いることにより、より常温に近い温度での動作も期待できます。従来このようなペタヘルツテクノロジーは、アト秒 X 線を用いて推進されていますが、今回の結果は、光を用いた相補的なアプローチが存在することを示しています。

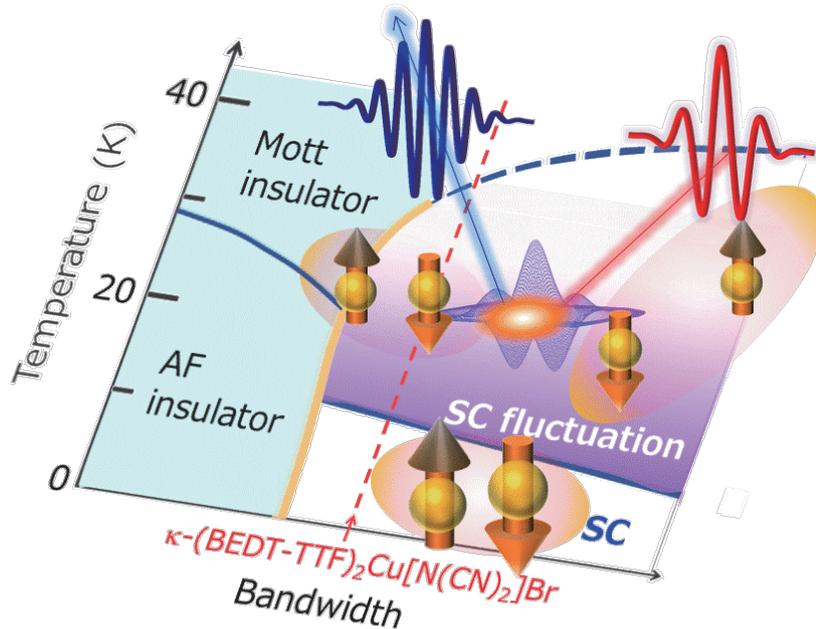


図5 有機超伝導体の温度—圧力相図と、超伝導ゆらぎ（SC fluctuation）における第二高調波発生概念図

用語解説

（注1）高温超伝導体

水銀、鉛、ニオブなどで観測されていた超伝導は、転移温度が20 K以下であった。ところが1980年代後半、銅酸化物 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ （イットリウム系）や $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ （ビスマス系）など、液体窒素温度（マイナス196度、絶対温度77 K）より高温で超伝導となる物質が発見された。その後2008年には、鉄ヒ素化合物の超伝導体 $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ （転移温度マイナス240度、絶対温度 ~ 30 K）が目撃された。銅酸化物では、モット絶縁体に対してキャリアドーピングを行うことによって超伝導への転移が起こる。一方、鉄ヒ素系では、さらに複数の軌道がからみあうことが重要だと考えられる。いずれも、BCS理論では説明できないとされ、長年の研究にもかかわらず、詳細な機構は明らかにされていない。

（注2）有機超伝導体

1970年代に導電性ポリマー（2000年ノーベル化学賞）が発見される以前は、（金属元素を含まない有機物のみの化合物としては）超伝導はおろか、通常の“金属”をつくることでさえ困難であった。しかし、有機物のみからなる超伝導体の研究は1970年代の後半に始まり、1980年代には、TMTSF（テトラメチルテトラセレンフルバレン）やBEDT-TTF（ビスエチレンジチオテトラチアフルバレン）と呼ばれる分子の化合物において、マイナス270 \sim 260度（絶対温度0.3 K-10 K）程度の転移温度の超伝導が観測された。その後、金属をドーピングしたフラーレン（ C_{60} ）固体ではより高い転移温度（ ~ 30 K）が観測されている。これらの有機超伝導体の中で、本研究の対象物質であるBEDT-TTF化合物は、銅酸化物の高温超伝導体と同様に、モット絶縁体（クーロン反発の効果によって電荷が動けなくなった絶縁体）に関係した機構（クーロン反発や反強磁性相互作用）が示唆されているが、いずれの物質系でも詳細な機構は解明されていない。

（注3）光周波数コム

光周波数コム（2005年ノーベル物理学賞）は、周波数軸上で等間隔に並んだ櫛（コム）形の離散スペクトルを持つレーザー光源である。極めて高い周波数精度を持つことから、周波数標準（原子時計）の高精度化に応用されている。本研究で用いた、モードロック超短パルスレーザーの CEP の安定化は、光周波数コム技術の一つとしても知られており、時間軸上での CEP の情報は、光コムの周波数特性と対応している。マイクロ波帯（～100 ギガヘルツ）の電波を、光周波数（ペタヘルツ）の精度で制御できるというその特徴は、光コムの周波数（～ペタヘルツ）が、共振器長で決まる繰り返し周波数（～100 メガヘルツ）と、キャリアエンベロープオフセット周波数（櫛形スペクトルを光領域から、ゼロ近傍まで外挿した際のオフセット～100 ギガヘルツ）のみで記述できることによる。

（注4）超伝導ゆらぎ

超伝導は、クーパー対と呼ばれる電子対が、凝縮を起こすことによって生じる、電気抵抗がゼロになる現象である。この凝縮が起きる温度が超伝導の転移温度である。しかし、多くの超伝導体では、この超伝導転移温度よりも高温において、電気抵抗や磁気的性質の温度依存性に特徴的な振る舞いが見られる。これらは、クーパー対の形成が時間的、空間的に変動している（できたり壊れたりしている）ことによると考えられている。超伝導ゆらぎと呼ばれるこの現象は、本研究の対象物質である有機超伝導体や銅酸化物高温超伝導体など、多くの第二種超伝導体で見られる現象であり、超伝導の機構解明に関係していることから、多くの研究が行われている。

論文情報

雑誌名： *Nature Communications*

論文タイトル： Petahertz non-linear current in a centrosymmetric organic superconductor (空間反転対称性を持つ有機超伝導体におけるペタヘルツ非線形電流)

著者：川上洋平、天野辰也、大橋拓純、伊藤弘毅（東北大理）、中村優斗、岸田英夫（名大工）、佐々木孝彦（東北大金研）、川口玄太、山本浩史（分子研）、山本薫（岡山理科大）、石原純夫（東北大理）、米満賢治（中央大理工）、岩井伸一郎（東北大理）

DOI 番号：10.1038/s41467-020-17776-3

URL： <https://www.nature.com/articles/s41467-020-17776-3>

謝辞

本研究は、科学技術振興機構（JST）戦略的創造研究推進事業 CREST 「キャリアエンベロープ位相制御による対称性の破れと光機能発現」(研究代表者 岩井伸一郎 JPMJCR1901), および文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) 基礎基盤研究 「強相関量子物質におけるアト秒光機能の開拓」(研究代表者 岩井伸一郎 JPMXS0118067426)の助成を受けて行われました。

放射光でついに見えた磁気オクタポール

～熱を電気に変える新たな担い手～

2021年9月22日 物理学専攻 准教授 是常 隆

発表のポイント

- 大きな熱電効果を示す物質で、その起源となる『磁気八極子（磁気オクタポール）』の実験的な検出に成功しました。
- 放射光X線による新しい検出原理が実証されたことで、今後さまざまな物質への研究展開が可能となります。
- 放射光X線を用いた分光実験に新しい方向性を提供し、これまで観測が困難であった『新たな自由度』に基づく物質の性質の理解を深めることに貢献します。

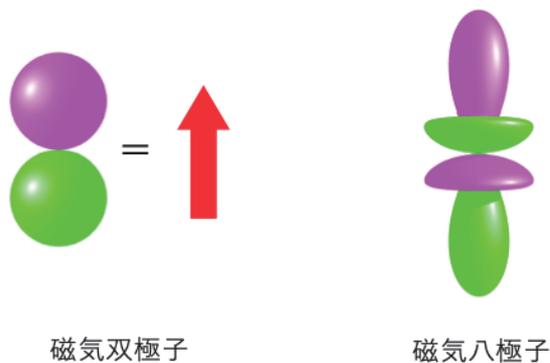


図1. 磁気双極子(スピン)と磁気八極子

左は磁気双極子で、磁石のNとSに相当するピンクと緑の空間分布に偏りがあり、これが磁石としての性質を担います。一方、 Mn_3Sn の物質機能の起源と理論的に予測された磁気八極子は、右です。ピンクと緑の領域はちょうど打ち消し合うように上下に分布し、スピンの打ち消し合う様に整列した反強磁性と呼ばれる状態とも対応しています。従って磁気八極子は、磁石としての性質を持ちません。しかしながら原子レベルで磁気八極子を眺めると、ピンクと緑の空間分布が局所的な巨大磁場を生み出します。この局所的な巨大磁場が、強磁性状態のような大きな物性応答の起源と考えられています。

概要

物質中の電子が持つスピンを起源とする高い熱電変換効率や大きな異常ホール効果は、これまで電子スピンの揃った状態でのみ起こると考えられてきました。その一方で、スピンの互いに打ち消し合うように整列した反強磁性と呼ばれる状態でも、大きな効果が報告されており、スピンは打ち消し合っているにも関わらず、何らかの状態が打ち消し合わずに向きを揃えていると考えられていました。これは、「磁気八極子」として理論的に予測されていましたが、実験的には検出されていませんでした。

東北大学金属材料研究所の木俣基准教授、野尻浩之教授と高輝度光科学研究センター（JASRI）の雀部矩正博士研究員、小谷佳範主幹研究員、横山優一博士研究員、東北大学大学院理学研究科の栗田謙亮大学院生、是常隆准教授、物質・材料研究機構の山崎裕一主幹研究員、高エネルギー加速器研究機構（KEK）物質構造科学研究所の中尾裕則准教授、雨宮健太教授、京都大学複合原子力科学研究所の田端千紘助教、東京大学大学院理学系研究科の中辻知教授、東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センターの中村哲也教授らの研究グループは、磁石のミクロな起源である電子スピンの互いに打ち消しあう反強磁性と呼ばれる状態の中に潜んだ「磁気八極子（磁気オクタポール）」を放射光X線実験から明らかにしました。

今回検出された磁気八極子は、従来のスピンよりも高速制御が可能で、スピントロニクスデバイスなどの大幅な高速化にも貢献すると期待されています。本研究の成果は新規なスピントロニクス

スや熱電変換機能を生み出す起源を探る新たな手法の提案であるとともに、放射光を用いた X 線磁気分光や共鳴 X 線散乱の新たな可能性を拓くものです。

本成果は 2021 年 9 月 22 日 10:00(英国時間)に、*Nature Communications* 誌にオンラインで公開されました。

詳細な説明

研究背景

物質中の電子スピンは、それ自身がマイクロな磁石となっており、向きを揃えて整列することで強磁性^{*1}と呼ばれる状態となります。強磁性は永久磁石や、パソコンのハードディスクの記録媒体などに広く応用されています。その一方でスピンの互いに打ち消し合う様に向きを違えて配列した状態も存在します。このような状態は反強磁性^{*2}と呼ばれ、原子一つ一つには磁石となる性質は残っているものの、物質全体として磁石としての性質を持ちません。

一方、近年熱エネルギーを直接電気に変換する熱電変換^{*3}技術などに電子のスピンを積極的に活用する試みが、広い意味でのスピントロニクス^{*4}として注目を集めています。電子のスピンは磁石の主な起源となっているだけでなく、スピントロニクス分野でも重要であり、例えば熱電効果の一つである異常ネルンスト効果^{*5}は、強磁性状態で大きな効果が発現することがこれまで知られていました。

ところが最近になり、全体としては磁石としての性質を持たないはずの反強磁性体でも大きな異常ネルンスト効果が発見され、スピンは打ち消し合っているにも関わらず、何らかの状態が打ち消し合わずに揃っているのではないかと考えられていました。この隠れた自由度は磁気八極子(磁気オクタポール)と呼ばれ(図 1 右参照)、磁石としての性質は持っていませんが、原子レベルでは局所的な巨大磁場を持っており、それが強磁性と同じ様な巨大な物性応答の起源と考えられます。磁気八極子は電子の持つ自由度を分解したときに出現する多極子自由度^{*6}の一つで、理論的にその存在が指摘されていたものの、実験的には明らかになっていませんでした。

成果の内容

今回研究グループは、磁気八極子の揃った状態が期待されていた反強磁性体 Mn_3Sn ^{*7} に、放射光 X 線を用いた測定を適用し、磁気八極子の検出を試みしました(図 2)。実験は大型放射光施設 SPring-8^{*8} の BL25SU ならびに KEK の放射光実験施設フォトンファクトリー^{*9} の BL-16A において X 線磁気円二色性(XMCD)^{*10} という計測技術を用いて行いました。XMCD は、これまで主に強磁性体の磁気モーメントの起源であるスピンモーメントや電子の公転に対応する軌道モーメントを円偏光した X 線によって検出する手法として発展してきました。一方、XMCD には電子のスピンや軌道モーメントを反映した信号の他に、一種の多極子を反映した T_z 項と呼ばれる信号の存在が古くから知られていたものの、この信号が今回注目する磁気八極子の観測に役立つかはわかっていませんでした。

精密な実験の結果、得られた XMCD の信号は、スピンに由来するものでは説明できないことが明らかになりました。さらに理論計算との比較の結果、確かに磁気八極子の発現と対応したものであることが示されました(図 3)。

円偏光 X 線を用いた磁気八極子の検出原理は、最近、本共同研究グループから独立に 2 つの理論研究として予測されており[1, 2]、今回、共同でその原理を実験的に証明することに成功しました(図 4)。

意義・課題・展望

近年、従来から広く応用されてきた強磁性体のみならず、反強磁性体でも大きな熱電効果やスピントロニクスに関わる現象が多く発見されており、その起源解明に向けた研究が盛んに行われています。またそれらの物質では、 Mn_3Sn と同様に多極子自由度が引き金となっているものも少なくないと期待されます。従って、今後様々な機能を持つ反強磁性体に放射光X線を用いたX磁気分光や共鳴X線散乱といった手法を適用することで、多極子が起源となる新しい物性の理解を深めることが期待されます。

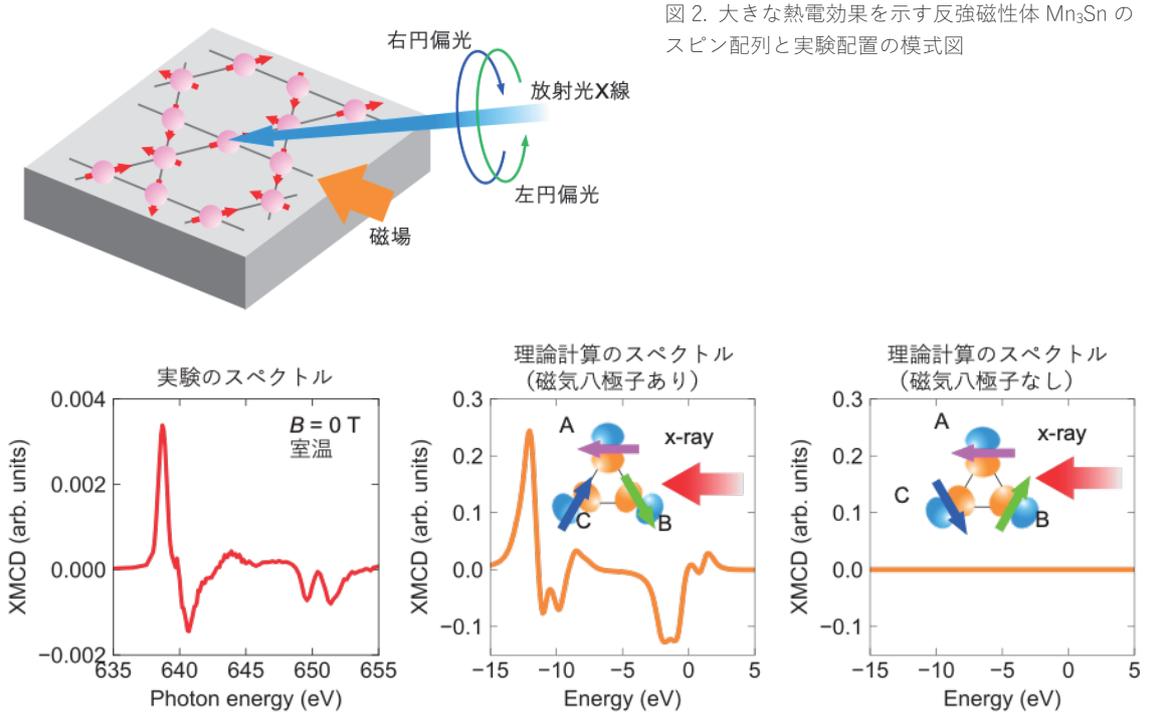


図2. 大きな熱電効果を示す反強磁性体 Mn_3Sn のスピン配列と実験配置の模式図

図3. 実験から得られたXMCDのスペクトル(左)と理論計算によるスペクトル(中央、右)。太いオレンジの実線は各原子サイトA、B、Cからの和であり、実験で観測されるXMCD信号を示しています。中央のパネルの内挿図が磁気八極子の出現する磁気構造で、実際の Mn_3Sn ではこの磁気構造が実現します。右パネルの内挿図は磁気八極子の出現しない反強磁性磁気構造を示しており、各原子サイトからの寄与が打ち消し合いXMCD信号が消失します。

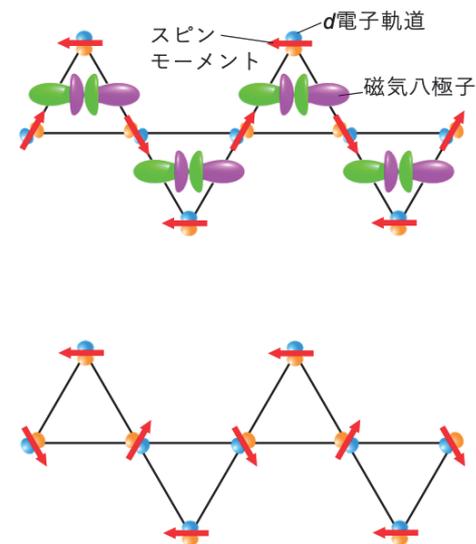


図4. Mn_3Sn におけるスピン(磁気双極子)と磁気八極子の配列パターンの模式図

実際の Mn_3Sn では上の磁気構造が実現しており、下の磁気構造は比較に利用した Mn_3Sn とは異なる磁気構造です。赤矢印はスピン、水色とオレンジのひょうたん型のイラストは各原子位置での d 電子軌道の形状を表しています。またピンクと緑で描く電子軌道が磁気八極子を示しています。上の磁気構造では三角形の頂点に位置する各Mnのスピンと軌道の相対的な配置(向き)が位置ごとに異なります。このため、各Mn原子位置からの寄与を足し合わせると、スピンは打ち消し合ってしまうますが、磁気八極子の対称性を持った自由度が残ることが理論的に示唆されていました。その結果、局所的な巨大磁場を起源とする物性応答が有限に観測可能となります。このように、3つのMn原子の集団(クラスター)で有限の磁気八極子が出現することが、この物性の起源であり、クラスター磁気八極子

と呼ばれています。一方下の磁気構造では各 Mn 原子位置のスピンと軌道の相対的な配置は同じであり、全体を足し合わせると全ての自由度が打ち消し合い消失してしまいます。

発表論文

雑誌名：*Nature Communications*

英文タイトル：X-ray study of ferroic octupole order producing anomalous Hall effect

全著者：Motoi Kimata, Norimasa Sasabe, Kensuke Kurita, Yuichi Yamasaki, Chihiro Tabata, Yuichi Yokoyama, Yoshinori Kotani, Muhammad Ikhlas, Takahiro Tomita, Kenta Amemiya, Hiroyuki Nojiri, Satoru Nakatsuji, Takashi Koretsune, Hironori Nakao, Taka-hisa Arima, & Tetsuya Nakamura

DOI：10.1038/s41467-021-25834-7

文献

[1] Yuichi Yamasaki, Hironori Nakao, and Taka-hisa Arima, "Augmented Magnetic Octupole in Kagomé 120-degree Antiferromagnets Detectable via X-ray Magnetic Circular Dichroism" J. Phys. Soc. Jpn. 89, 083703 (2020).

[2] Norimasa Sasabe, Motoi Kimata, and Tetsuya Nakamura, "Presence of X-Ray Magnetic Circular Dichroism Signal for Zero-Magnetization Antiferromagnetic State" Phys. Rev. Lett. 126, 157402 (2021).

プレスリリース

X線による磁気検出の例外的ケースを理論予測 ～30年間の常識を覆す基礎研究の成果～

http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_release/2021/210417/

専門用語解説

※1 強磁性

電子スピンの同じ方向に向きを揃えて整列した状態。一般に鉄などではこの状態が実現しており、磁石に引きつけられます。

※2 反強磁性

電子スピンの隣り合う原子位置で向きを違えて配列し、全体としては打ち消し合ってしまう状態。多くの配列の仕方が可能で、隣り合う原子位置で反平行になっていなくても、例えば今回着目した Mn_3Sn の様に全体として打ち消し合う状態は反強磁性に分類されます。

※3 熱電変換

熱エネルギーから直接電気を生成したり、またはその逆効果（電気を熱エネルギーに変換）を実現する技術。代表例としてはゼーベック効果やペルチェ効果が知られており、卓上冷温庫などに応用されています。またゴミ焼却熱を利用した発電や、人体の熱を利用して心臓ペースメーカー用の長寿命電源として応用するなど、グリーン社会や人に優しい医療の実現に貢献する材料として期待されています。

※4 スピントロニクス

電子の電荷とスピンを両方活用し、より効率的なエレクトロニクスを実現する研究分野。

※5 異常ネルンスト効果

熱電効果の一つ。物質に温度勾配をつけるとそれに垂直方向に電圧が生じる現象。縦方向の温度勾配に対して横方向の電圧が生じるので、大面積熱電素子の実現に貢献すると期待されています。

※6 多極子自由度

電子の持つ自由度を細かく分解（展開）した時に出現する自由度。スピンも多極子の一つと考えることができます。本研究で対象とした XMCD で検出可能な多極子は、電子スピンよりも複雑な形をしています。また理論的には今回の磁気八極子以外にも様々な種類の多極子が予測されており、多彩な物質機能の起源となることが期待されています。

※7 Mn_3Sn

Mn_3Sn は図 2 の様な三角形を基調とした磁気構造を持ち、スピンの互いに 120 度の角度をなして配列することで、全体のスピンはほとんど打ち消し合っています。東北大学金属材料研究所で初めて単結晶が合成され、中性子回折等の実験によって性質が詳しく調べられました。

※8 大型放射光施設 SPring-8

理化学研究所が所有する兵庫県の播磨科学公園都市にある世界最高性能の放射光を生み出す大型放射光施設で、利用者支援は JASRI が行っています。SPring-8 の名前は Super Photon ring-8 GeV に由来。SPring-8 では、放射光を用いてナノテクノロジー、バイオテクノロジーや産業利用まで幅広い研究が行われています。

※9 放射光実験施設フォトンファクトリー

KEK つくばキャンパスにある放射光施設です。電子加速器から生まれる放射光で、物質・生命の構造から機能発現のしくみを明らかにする研究を推進しています。PF リング (2.5 GeV)、PF アドバンスリング (PF-AR, 6.5 GeV) という、特徴ある 2 つの放射光専用の光源加速器を有し、KEK で培ってきた放射光技術・加速器技術により世界最先端の研究の場を提供しています。

※10 X線磁気円二色性(XMCD)

磁性体の X 線吸収係数が円偏光の方向（右回りか左回りか）に依存する現象。円偏光方向に対する吸収スペクトルの差が XMCD スペクトルとなります。X 線の吸収波長が元素ごとに異なる性質を利用して、特定の元素の磁気モーメントを測定することができます。これまでは主にスピンモーメントや軌道モーメントの定量的な評価に用いられてきました。

共同研究機関および助成

本研究は、SPring-8 の研究課題番号 2018A1525、2018B1533、2019A1589、KEK-PF の課題番号 2018S2-006、2018PF-31 において行われたものです。また本研究の一部は、科学研究費補助金 (19K03736、19H04399)、新学術領域「J- Physics：多極子伝導系の物理」(JP15H05882、JP15H05883、JP15H05885)、科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業個人型研究 (さきがけ) (JPMJPR177A)、同戦略的創造研究推進事業チーム型研究 (CREST) (JPMJCR1861)、同光・量子飛躍フラッグシッププログラム (Q-LEAP) (JPMXS0118068681) などの支援を受けて行われました。

J-PARC ハドロン実験施設で 奇妙な粒子と陽子の散乱現象を精密に測定

原子核を作る力の解明に大きな前進

2021年11月8日 物理学専攻 准教授 三輪 浩司

発表のポイント

- ストレンジクォークを含む「奇妙な粒子」^(注1)と呼ばれるシグマ粒子と陽子を直接散乱させることで、粒子間にはたらく「拡張された核力」^(注1)を解明する手法を確立
- 寿命が非常に短く数 cm しか飛行しないシグマ粒子と陽子との散乱現象の精密測定に世界で初めて成功
- 本成果で確立した実験手法を異なる種類の「奇妙な粒子」と陽子との散乱実験に適用しデータを蓄積することで、拡張された核力の解明が大きく進むことが期待される

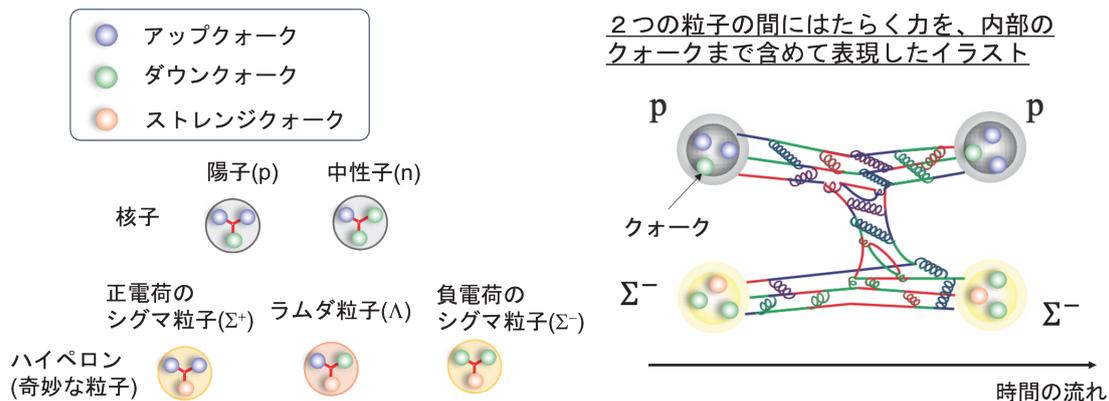


図1：陽子、中性子およびストレンジクォークを含む奇妙な粒子は、3つのクォークから構成されています（左図）。この3つのクォークの構成の違いで、様々な種類の粒子が存在します。これらの粒子の間の相互作用は、内部に含まれるクォークが相互作用に寄与するため、非常に複雑になります（右図）。特に2つの粒子が重なり合うような近距離での相互作用にはクォークの効果が強く現れます。核力および拡張された核力においてクォークが担う役割を理解するために、クォークの種類を変化させて相互作用がどう変化するかを調べる事が重要になります。

概要

原子核を構成する根源的な力である陽子と中性子の間にはたらく核力は、陽子・中性子の構成要素であるクォークが関わる非常に複雑な力です。特に陽子・中性子が重なり合うような近い距離で大きな反発力が生じる理由は未だに解明されておらず、クォークが重要な役割を果たすとの指摘があります。そのため、ストレンジクォークを含んだハイペロンと、陽子との間にはたらく力を調べることで、核力におけるクォークの役割を明らかに出来ると期待されています。東北大学大学院理学研究科 三輪浩司 准教授らの研究グループは大強度陽子加速器施設 J-PARC のハドロン実験施設^(注2)で、ハイペロンの一種であるシグマ粒子を大量に生成し、そのシグマ粒子と陽子の散乱の角度分布^(注3)を高精度で測定することに世界で初めて成功しました。今後、クォークの構成が異なる様々なハイペロンと陽子との間の散乱データを蓄積することで、拡張された核力の性質が明らかになると期待されます。本成果は2021年10月28日（米国時間）に *Physics Review C* でオンライン公開されました。

研究の背景

陽子と中性子の間には、平均すると引力的な力（核力）がはたらいて、陽子・中性子を結びつけて原子核を構成します。この核力は、陽子と中性子が比較的離れたときには引力となりますが、陽子と中性子が重なり合うような近い距離では大きな反発力へと変化します。この引力と反発力のバランスのおかげで原子核は安定に存在することができます。この核力における距離の依存性などの相互作用の詳細は、加速器で加速された陽子を、標的となる別の陽子にあって、散乱される様子を調べることで明らかになってきました。しかし、そのような核力の性質がなぜ生じるのかは十分解明されておらず、特になぜ近距離で大きな反発力となるのかについては、全く分かっていません。このような陽子と中性子が重なり合うような近距離では、図1に示すように、粒子内部に存在する構成要素であるクォークが重要な働きをすると考えられます。そこで、異なる種類のクォークを含んだ粒子と、陽子との間にはたらく「拡張された核力」を調べることで、核力におけるクォークの役割を明らかにすることが出来ると考えられています。そのため、陽子・中性子に含まれるアップクォークおよびダウンクォークの次に軽いストレンジクォークを含んだ、いわゆる奇妙な粒子（ストレンジクォークを含む粒子は奇妙な粒子やハイペロンと総称されます）と陽子との間にはたらく拡張された核力を調べるのが重要になります。2つの粒子の間にはたらく力を調べるためには、対象となる2つの粒子を直接衝突させ、どの方向にどれだけ散乱されやすいか（微分断面積と呼びます）を測定することが必要です。しかし、ハイペロンは寿命が非常に短く、数cmを飛行するだけですぐに崩壊してしまうため、これまではわずかな回数の散乱現象しか測定されていませんでした。

研究の内容と成果

東北大学・高エネルギー加速器研究機構（KEK）・日本原子力研究開発機構（JAEA）・京都大学・大阪大学などからなる国際共同実験 E40 グループ（実験責任者：東北大学 三輪浩司、15機関、71名）はハイペロンの1つである負電荷を持つシグマ粒子が液体水素標的中を飛行する際に、ごく稀に標的中の陽子と散乱する現象を測定しました。散乱の際に叩き出された陽子を検出し、どの方向にどれだけ散乱されやすいかという微分断面積（散乱の確率の角度依存性）を精度良く測定することに初めて成功しました。図2に今回の実験で測定された微分断面積の結果（黒丸）を過去の測定結果（赤丸）とともに示しています。また、陽子と中性子間にはたらく核力を、ストレンジクォークを含んだハイペロンにも拡張した理論計算の予想とともに示しています。理論計算とデータを比較すると、クォークをあらわに取り扱った理論計算（図2の青の点線）が予想するように、シグマ粒子は前方方向に散乱されやすいことが確認されました。しかし、実験データと理論計算の間にはかなりの差があることが分かりました。今回測定された実験データは、これらの理論計算を改良するための指針となり、拡張された核力の理解が今後飛躍的に進むことが期待されます。

実験では、J-PARC ハドロン実験施設で供給される大強度のパイ中間子^(注4)のビームを液体水素標的に照射して、従来の実験の約100倍のシグマ粒子を作り出しました。生成されたシグマ粒子のほとんどは、散乱や反応をせずにそのまま崩壊してしまうので、大量のシグマ粒子を生成することが重要なポイントとなります。従来の実験では、散乱現象を特定するために、反応を可視化する検出器を用いていましたが、可視化にかかる時間が長く、その間に通過した複数のビームが映り込んでしまうため、散乱現象を同定するためにはビーム強度を抑える必要がありました。本研究では、生成されたシグマ粒子が液体水素標的内の陽子と散乱して、叩き出された陽子や、散乱後にシグマ粒子が崩壊して放出した粒子をCATCHと呼ばれる実験装置（図3）で検出することで散乱現象を特定できるようにしました。この装置は、粒子の通過時間と

通過位置をすぐれた精度で測定することによって、J-PARCの大強度のパイ中間子ビームを用いる実験環境下でも、次々起こる現象を一つ一つ分けて効率的に測定することを初めて可能にしたもので、科学研究費補助金によって東北大学の研究者が開発・製作しました。今回の結果は、2019年2月から3月のJ-PARCの利用運転時間に行われた実験で得られた成果です。

今後の展望

拡張された核力の全貌を解明するには、異なるハイペロンと陽子や、ハイペロンどうしの間にはたらく力を調べるのが重要です。これまでもJ-PARCハドロン実験施設では、このようなハイペロンを原子核に入れたハイパー核（超原子核）と呼ばれる原子核の性質を調べてきました。ハイペロンと陽子の散乱実験と、ハイペロンを含む原子核であるハイパー核の研究が拡張された核力を解明するための大きな柱であり、今回の散乱実験の成功は研究の大きな前進になります。

今回は、ハイペロンの一つである負電荷を持つシグマ粒子と陽子の散乱の高精度測定の結果を報告しました。E40実験では、負電荷のシグマ粒子が陽子と反応して、別種のハイペロンであるラムダ粒子と中性子に変化する反応や、正電荷のシグマ粒子と陽子の散乱の測定も行っており、現在データ解析を進めています。クォークに基づいて拡張された核力を理解するには、これらの反応を統一して記述できるような理論の枠組みを構築することが重要です。この拡張された核力は、粒子間のスピンの状態に依存することが分かっているので、今後はハイペロンのスピンを制御した散乱や、シグマ粒子とは別種のハイペロンであるラムダ粒子と陽子の散乱の測定の準備をしています。本結果を含め、今後蓄積されるハイペロンと陽子との高精度の散乱データを再現するように理論を改良することで、「現実にもつれた拡張核力の理論」が構築できると期待されます。この現実にもつれた拡張核力の理論は、ハイパー核の多様な性質を解明するための基盤ともなります。

また、中性子星^(注5)の内部では、中性子が重力によって高密度状態に閉じ込められており、ラムダ粒子やシグマ粒子などのハイペロンが安定して存在する可能性も指摘されています。これらの現象は、ハイペロンと中性子との間にはたらく力に本質的に依存するので、今回の結果や今後我々が蓄積する散乱データは中性子星の構造を理解する上でも極めて重要です。観測で見つかっている2倍の太陽質量を持つ重い中性子星の中では、ハイペロンが我々の全く知らない力を及ぼしあうことで、重い中性子星を安定に存在させているのではないかと指摘されています。今回、我々が成功を収めたこの実験手法は、こうした中性子星内部の未知の力の解明にもつながると期待されています。

用語の説明

(注1) 奇妙な粒子と拡張された核力

素粒子であるクォークは6種類ありますが、安定に存在するのは質量が最も軽い世代をなすアップクォーク (u) とダウンクォーク (d) の2種類です。図1 (左) に示すように陽子と中性子は、このアップクォークとダウンクォークが異なるクォーク構成で束縛された状態です。すなわち、陽子は2つのアップクォークと1つのダウンクォーク (uud)、中性子は1つのアップクォークと2つのダウンクォーク (udd) からなります。この3つのクォークの構成の違いによって、数多くの粒子 (バリオンと総称されます) が存在します。その典型例が、三番目に軽いストレンジクォーク (s) を含んだ粒子です。「奇妙な」という名前がクォークについているため、ストレンジクォークを含んだ粒子 (特にバリオン) を奇妙な粒子やハイペロンと総称し

ます。今回測定した負電荷を持つシグマ粒子 (Σ^- と表記される) は(dds)からなります。正電荷を持つシグマ粒子 (Σ^+ と表記される) は (uus) であり、ラムダ粒子 (Λ と表記される) は(uds)からなります。

陽子・中性子(核子と総称される)の間には、パイ中間子を交換することで核力がはたらくと湯川秀樹博士が予言したのが核力研究の始まりでした。現在では、この核力を、ストレンジクォークを含んだ粒子と核子との間にはたらく力にも拡張し、ストレンジクォークを含んだ中間子を交換する描像(拡張された中間子交換模型)や、さらにクォークの間の相互作用も考慮して統一的に相互作用を記述しようとするのが「拡張された核力」の理論です。この拡張された核力の理論は、ハイペロンを原子核の構成要素としたハイパー核や中性子星などの構造を調べるうえで基盤となる重要なものです。

(注2) J-PARC ハドロン実験施設

茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC は、世界最高強度の陽子ビームで生成する多彩な 2 次粒子を用いて、さまざまな素粒子・原子核物理の研究や物質科学・生命科学の研究が行われています。その中にあるハドロン実験施設では、30 ギガ電子ボルトの陽子ビームを金の標的に当てて K 中間子やパイ中間子などの「ハドロンビーム」を作り、これを用いて原子核や素粒子の研究が行われています。今回のシグマ粒子は、このパイ中間子のビームをもとに作られる 3 次粒子のビームと言えます。実験の精度を向上させるためには、出来るだけ大量のシグマ粒子を生成することが重要となります。そのためパルス当たり約 107 個(5.2 秒毎に約 2 秒間ビームがでる)の世界最大強度のパイ中間子ビームを供給することができるハドロン実験施設は、本研究を行う上で最適な実験施設と言えます。

(注3) 散乱の微分断面積

粒子の間に力がはたらくことで、散乱現象が起きます。この散乱の起きる頻度は、単純に考えると粒子どうしが覆う断面積に対応するので、散乱断面積と呼ばれます。特に、散乱断面積の散乱角度による違いは、散乱の微分断面積と呼ばれます。実際には、散乱は、粒子間にはたらく力によって、散乱の頻度(断面積)や角度依存性(微分断面積)が大きく異なります。実験で微分断面積を測定することによって、粒子間にはたらく力を調べるのが可能となります。実際に、核子の間にはたらく核力は、加速器で加速された陽子や中性子(中性子は 2 次的に生成されていました)を、標的となる陽子に照射し、散乱の微分断面積を詳細に測定することによって調べられてきました。ハイペロンと陽子との間でも同様に散乱実験を行うことが重要だと言われていましたが、ハイペロンがすぐに崩壊してしまうという実験的な困難さから、これまで高精度の断面積測定は実現できませんでした。

(注4) パイ中間子

クォークと、その反粒子である反クォークのペアで構成される粒子を中間子と呼びます。最も軽い中間子がパイ中間子で、本研究でビームとして用いた負電荷のパイ中間子はダウンクォークと反アップクォークで構成されます。

(注5) 中性子星

宇宙には 10^{57} 個もの中性子が重力で束縛された半径 12 km 程度のコンパクトな天体が存在し、これを中性子星と呼びます。核力で束縛される原子核は、核子の数は多くても 300 個程度が限界ですが、中性子星は桁違いに多くの中性子が重力で束縛された巨大な原子核である

と言えます。質量の重い恒星が、超新星爆発で終焉を迎えた際に、重力で圧縮された星の芯が中性子星となって残されます。近年の天体観測で太陽の2倍の質量を持つ重い中性子星が複数観測されており、中性子星の中心の密度は、通常の原子核の5倍以上の高密度に達すると言われています。そのような高密度では高いエネルギーを持つ中性子がハイペロンに変化すると予想されますが、ハイペロンに変化することで星の圧力が下がるため、どのようなメカニズムで星の圧力を回復し、2倍の太陽質量を持つ中性子星を支えるかを解明することが大きな課題となっています。高密度ではハイペロンと複数の中性子との間にはたらく力が中性子星を支える圧力を作る上で重要であると指摘されています。私たちは、このハイペロンを含んだ多粒子間にはたらく力をハイパー核の研究を通して解明しようとしています。ハイペロンと核子の2粒子間にはたらく力を散乱実験によって理解しておくことは、この多粒子間にはたらく力をハイパー核研究から解明するための基盤となります。

国際研究チーム

本研究は東北大学、高エネルギー加速器研究機構(KEK)、日本原子力研究開発機構(JAEA)、京都大学、大阪大学(理学研究科、核物理研究センター)、理化学研究所(高エネルギー原子核研究室、中間子科学研究室、放射線研究室)、千葉大学、岡山大学、韓国・高麗大学、フランス・OMEGAグループ、ロシア・原子核合同研究所、ジョージア・ジョージア工科大が参加する国際共同研究グループにより行われました。これらの機関は実験遂行に向けた検出器開発や実験の実施に貢献しました。東北大学がCATCH検出器を製作し、KEKおよびJAEAは、液体水素標的及びハイペロンの生成を測定する実験装置の整備・運転を主導しました。データ解析は東北大学、JAEA、京都大学、大阪大学を中心として共同で行われました。

参考図

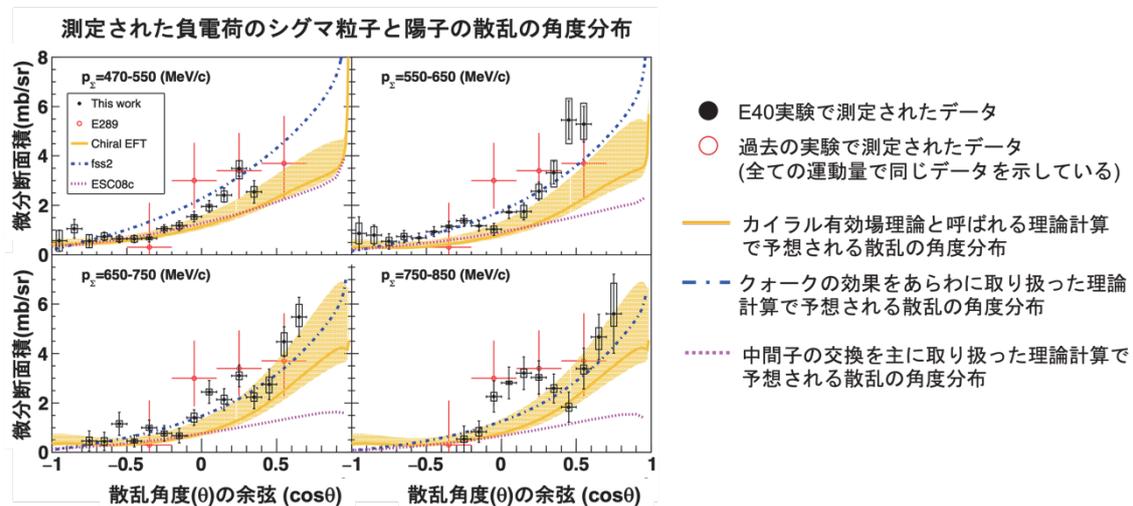
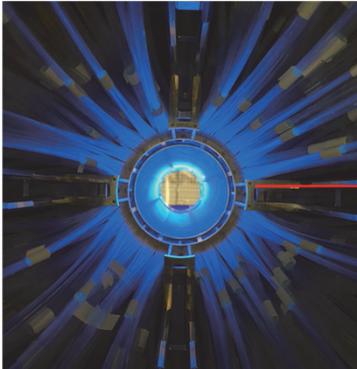
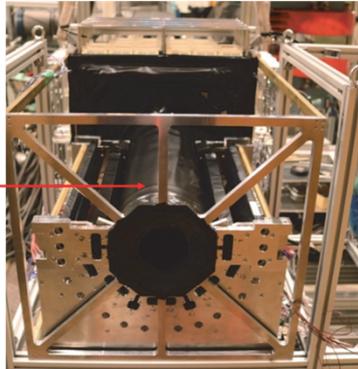


図2：測定された負電荷のシグマ粒子と陽子の散乱微分断面積。4つの図はシグマ粒子の運動量の大きさを4つの範囲に分けて、微分断面積を測定していることに対応します。データ点についている棒は測定の誤差を示しています。今回測定した結果(黒丸)は、過去に測定したもの(赤線の丸)に比べ非常に高い精度で測定できていることが分かります。過去の測定では、観測した事象数が少なく運動量の範囲で分けることができなかつたので、全ての運動量の範囲で、同じ測定データをここでは表示しています。測定データとともに示しているのは、いくつかの理論的な仮定に基づいた微分断面積の予想です。特に、粒子の中のクォークの効果をあらわに取り扱った理論計算(青い線)とデータはある程度一致していることが分かります。このような精度の高いデータを今後もさらに集めることで、粒子間の相互作用の全貌と、相互作用の起源に関する情報を得ることができると考えられます。

内側のファイバー検出器の写真



CATCH検出器の組み立て時の写真



実験装置の前に集合した実験グループのメンバー



図3：主要な検出器である CATCH 検出器の写真（左、中）。検出器の内側には（左）に示すように、放射線に対して発光するシンチレーションファイバーを張り巡らせることで、反応で生じる粒子の軌跡の測定を行なっています。その外側には放射線に対して発光する特殊な結晶を配置して、粒子の運動エネルギーを測定します。これらの情報から、どのような反応が起きたかを同定します。写真（右）は実験装置の前で撮った実験グループのメンバーの写真です。

謝辞

本研究は以下の科学研究費補助金による助成のもとに進めてまいりました。

若手研究 (A) 「シグマ陽子散乱断面積測定によるバリオン間力の斥力芯の起源の解明」(JSPS KAKENHI Grants No.23684011)

若手研究 (A) 「シグマ陽子散乱の位相差導出によるクォークパウリ斥力芯の大きさの決定」(JSPS KAKENHI Grants No.15H05442)

基盤研究 (A) 「ハイペロン陽子散乱実験によるバリオン間相互作用研究の新展開」(JSPS KAKENHI Grants No.18H03693)

新学術領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」公募研究「J-PARC 二次ビーム高強度化のための汎用トリガーマジュールの開発」(JSPS KAKENHI Grants No.15H00838)

基盤研究 (A) 「ハイパー核ガンマ線分光で解明する ΛN 相互作用の荷電対称性」(JSPS KAKENHI Grants No.15H02079)

新学術領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」提案型研究「中性子過剰核物質中のストレンジネス」(JSPS KAKENHI Grants No.24105003)

新学術領域「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」提案型研究「ストレンジ・ハドロンクラスターで探る物質の階層構造」(JSPS KAKENHI Grants No.18H05403)

論文情報

雑誌名： *Physics Review C*

論文タイトル： Measurement of the differential cross sections of the Σ^-p elastic scattering in momentum range 470 to 850 MeV/c

著者： K. Miwa et al. (三輪浩司 東北大学大学院理学研究科)

DOI 番号： 10.1103/PhysRevC.104.045204

URL： <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevC.104.045204>

巨大ガス惑星の新たな形成モデルを提唱

太陽系外巨大惑星の落下問題解決と質量分布再現に成功

2020年3月17日 天文学専攻 教授 田中 秀和

発表のポイント

- 巨大ガス惑星^(注1)の質量や軌道の分布を説明する新たな形成モデルを、惑星形成現場の最新数値流体計算に基づいて提唱。
- 巨大ガス惑星は普遍的な進化経路をたどることを発見。同時に従来問題であった惑星落下^(注2)を解決。
- 観測されている原始惑星系円盤^(注3)環境の下で系外巨大ガス惑星の質量分布を再現することに成功。

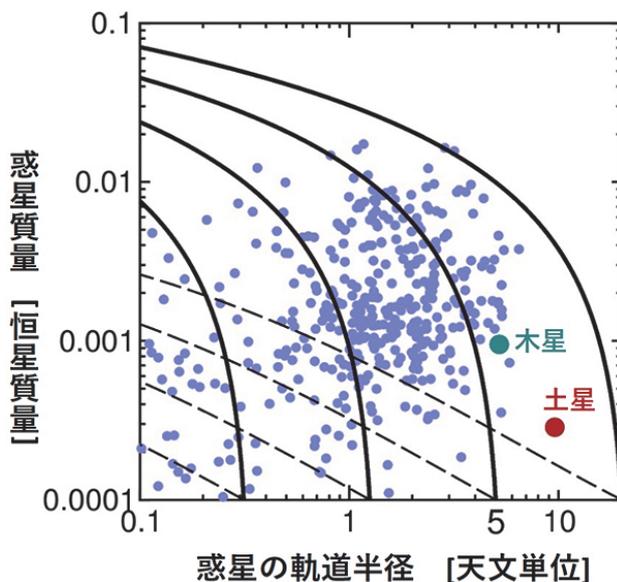


図1：惑星質量と惑星軌道半径の進化経路の図。実線は本研究の結果で、破線は従来研究の1例。青点は観測された系外巨大惑星で、緑は木星、赤は土星を表す。従来研究の進化経路では急速な惑星落下のため重い巨大惑星をつくれな。本研究の進化経路であればすべての系外惑星を形成可能である。

概要

これまで数千個の太陽系外の惑星^(注4)が発見されましたが、系外巨大ガス惑星の質量や軌道の分布を説明することは未だできていませんでした。また、巨大ガス惑星は原始惑星系円盤という若い恒星の回りがあるガス円盤の中でガスを大量に集積してできたとされていますが、この原始惑星系円盤から受ける抵抗によって巨大ガス惑星は急速に恒星へ落下してしまうことが指摘されており大問題となっていました。

東北大学大学院理学研究科の田中秀和教授を中心とした研究グループは、数値流体計算に基づいた巨大ガス惑星形成の正確な理論モデルを新たに構築することで、この問題を解決しました。新たな巨大惑星形成モデルにより、巨大ガス惑星の落下と成長は原始惑星系円盤の環境に依らない進化経路をたどること、またその際の惑星の落下は十分抑制されることが明らかになりました(図1)。巨大ガス惑星の最終的な質量は原始惑星系円盤の総質量で決まります。この形成モデルは、観測されている原始惑星系円盤から整合的に系外巨大惑星の質量分布を再現することにも成功しました(図2)。

本研究成果をまとめた論文は、2020年3月13日付けで『The Astrophysical Journal』電子版に掲載されました。

詳細な説明

数千個の太陽系外の惑星が発見され、系外惑星の特に巨大ガス惑星の質量や軌道の分布が明らかになってきましたが、これらの分布がどのようにしてつくられたのかについては分かっていませんでした。系外惑星や太陽系の惑星の起源としては若い恒星の回りに通常存在する原始惑星系円盤というガス円盤の中でつくられたとする説が有力です。木星やさらに木星の十倍以上も重い系外巨大ガス惑星は強い重力で原始惑星系円盤のガスを大量に集め成長したものだと考えられています。しかし、ガスを集積すると同時に巨大ガス惑星は原始惑星系円盤から抵抗も受けて惑星は恒星へと急速に落下してしまうことが多くの研究者によって指摘され、それが深刻な問題となっていました。系外惑星の木星質量を大きく越えるものは、この落下を考慮すると全く説明できませんでした。

今回東北大学の田中秀和教授を中心とした研究グループは、巨大ガス惑星の成長と落下についての新たな理論モデルを、最新の数値流体計算に基づき構築しました。この新たな巨大ガス惑星形成モデルにより、成長と落下の進化経路は原始惑星系円盤の状態には依存しない普遍的なものになることと惑星落下は十分抑制され、もはや問題とならないことが明らかになりました(図1)。惑星落下が抑制されたのは、惑星が周囲のガスを集積することでガス密度が低下し惑星が受ける抵抗も大幅に減少するためでした。従来は惑星へのガス集積と落下は別々に研究されていたため、このように両者に関係した惑星落下の抑制効果は見落とされていました。この落下抑制効果により新たな惑星形成モデルでは木星の十倍以上も重い系外巨大ガス惑星を落下させずにつくることも可能になります。一方、成長がいつ停止して惑星の最終質量がどの程度になるかは原始惑星系円盤の総質量によって決まります。新たな惑星形成モデルは、観測されている個々の原始惑星系円盤の総質量から整合的に系外巨大惑星の質量分布を再現することにも成功しました(図2)。

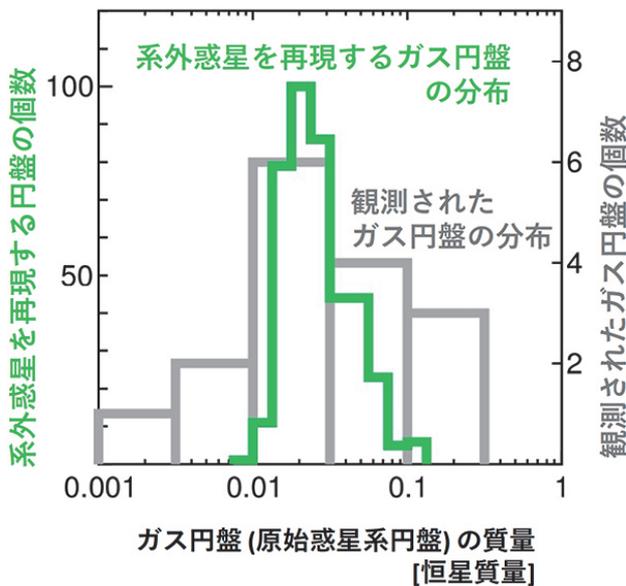


図2:本研究のモデルで系外惑星を再現するガス円盤(原始惑星系円盤)の質量分布と観測されたガス円盤の質量分布の比較。恒星質量の0.01倍以上では両者の質量分布の形はよく一致しており、これは観測された原始惑星系円盤から系外巨大惑星を再現できることを示している。恒星質量の0.01倍以下のガス円盤では巨大惑星は形成されない。

このように本研究の惑星形成モデルは系外惑星の中の巨大ガス惑星の形成をうまく説明するものです。今後は理論モデルをさらに発展させることで、地球程度の大きさをもち生命居住可能な系外惑星の形成モデルを構築することが目標となっています。

論文情報

雑誌名： *The Astrophysical Journal*

論文タイトル： Final Masses of Giant Planets III: Effect of Photoevaporation and a New Planetary Migration Model

著者： Hidekazu Tanaka, Kiyoka Murase, Takayuki Tanigawa

DOI 番号： 10.3847/1538-4357/ab77af

URL： <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ab77af>

用語説明

（注1）巨大ガス惑星

太陽系の木星や土星のように、水素やヘリウムからなるガスを主成分とした巨大な惑星。地球の百倍から数千倍の質量をもち、中心には岩石や氷からなる固体核をもつと考えられている。

（注2）惑星落下問題

惑星は原始惑星系円盤という若い恒星の回りにあるガス円盤の中で形成されたと考えられているが、この原始惑星系円盤から受ける重力的な抵抗によって惑星は急速に恒星へ落下することが指摘されている。惑星形成の研究において最も深刻な問題の1つとされている。本研究で巨大ガス惑星に対する落下問題は解決した。

（注3）原始惑星系円盤

誕生したばかりの若い恒星のまわりに普遍的に存在する主に水素からなるガスや塵でできた回転する円盤。この円盤の中で惑星が形成されたと考えられているため原始惑星系円盤と呼ばれている。円盤の寿命は1千万年程度で巨大ガス惑星はその間につくる必要がある。最近ではすばる望遠鏡やチリにあるアルマ望遠鏡により原始惑星系円盤の高解像度な画像が得られるようになり、多くの研究者がその画像から惑星形成過程の情報を得ようとしている。

（注4）太陽系外惑星（または系外惑星）

太陽以外の恒星のまわりを周回する惑星。1995年に初めて他の恒星のまわりで発見されてから様々な観測方法により数千個の系外惑星が見つかった。ホットジュピターとよばれる恒星のごく近くを周回する巨大惑星や、エキセントリックプラネットという彗星のような細長い楕円軌道をもつ惑星など、太陽系の惑星とは全く異なる惑星も数多く存在することが明らかになった。地球程度の大きさでかつ地球と似た温度環境をもち生命居住可能であるハビタブルプラネットの候補も20個以上見つかった。

イベント・ホライズン・テレスコープ・プロジェクトが M87 ブラックホールごく近傍の磁場の画像化に成功

2021年3月24日 学際科学フロンティア研究所、天文学専攻 准教授 当真 賢二

概要

ブラックホールの画像を初めて撮影したイベント・ホライズン・テレスコープ (Event Horizon Telescope; EHT) プロジェクトが、楕円銀河 M87 の中心にある巨大ブラックホールのごく近傍で、電波の偏光を捉えることに成功しました。これは、ブラックホールの周りに整列した磁場が存在することを初めて直接的に示す成果です。この観測結果は、5500 万光年離れた銀河の中心からどうしてパワフルなジェットを噴出できるのかを説明する鍵となります。

EHT プロジェクトには、理論解析班に学際科学フロンティア研究所の当真賢二准教授（理学研究科兼務）が参加しています。



M87 ブラックホール近傍の偏光画像。白線の向きは偏光の方向と一致し、ブラックホール周辺の磁場の向きと関係している。©Event Horizon Telescope Collaboration

詳細な説明

「私たちが今見ているのは、磁場がブラックホールの周りでどのように振る舞うか、そしてこの非常に小さい領域から銀河をはるかに超えて広がる強力なジェットがどう噴出するかを理解するためにとっても重要な証拠です。」EHT 偏光作業班の取りまとめ役で、オランダ・ラドバウド大学のモニカ・モシチプロツカ助教は、このように述べています。

2019年4月10日、科学者たちはブラックホールの最初の画像を公開し、ブラックホール・シャドウという暗い領域と、その周りの明るいリング構造を明らかにしました。それ以来、EHT プロジェクトは、2017年のM87観測データを深く解析し、M87ブラックホール周辺の大部分から来る光が偏光していることを発見しました。

「光の偏光からは天体物理において基礎となる磁場の情報を引き出すことができます。今回の結果はブラックホール近傍という極限状態における磁場の構造を初めて描き出しました」と、

EHT プロジェクトのメンバーで広島大学宇宙科学センターの笹田真人特任助教は述べています。

偏光サングラスのレンズのようなフィルターに光を通すと、特定の方向にかたよった光（偏光）だけが通り抜けます。また宇宙空間では、磁化された高温のガスから放射された光は偏光しています。偏光サングラスが、水面などで反射した光が偏光する性質を利用することで、反射による眩しさを抑えてよく見えるようになるのと同じように、天文学者は偏光現象を捉えることで、ブラックホール周辺で発する光の中から、そこで起きている現象を鮮明に教えてくれる情報だけを抜き出すことができます。つまり、ブラックホールのごく近くにある磁力線を描き出すことができるのです。

「新たに公開された偏光画像は、磁場によってブラックホールが物質を『食べ』、強力なジェットを噴出する方法を理解するための鍵となります」と、EHT で理論解析班の取りまとめを務め、上海交通大学李政道研究所の 水野陽介 T.D. Lee フェロー兼准教授は述べています。

M87 中心核から噴出して 5000 光年以上にわたって伸びる明るいジェットは、銀河がもつ最も神秘的でエネルギーに溢れた特徴の 1 つです。周囲にあるほとんどの物質がブラックホールに落ちる一方で、一部の粒子はブラックホールの重力に捕まる寸前に逃れ、ジェットとして宇宙空間に吹き飛ばされます。

天文学者は、ジェットの噴出現象をよく理解するために、様々な仮説に基づいてブラックホールの近くで物質がどのように振る舞うかを調べてきました。しかし、場合によっては銀河の大きさを超えるほどのジェットが太陽系と同じくらい小さい領域からどのように噴出するのか、どのように物質がブラックホールに落ちるのかという問題は、未だ正確には解明されていません。EHT が新たに公開したブラックホールのごく近傍の偏光画像を用いて、落ち込む物質と噴出する物質とが交錯するブラックホールのすぐ外側の領域を初めて調べることができました。そして理論解析の結果、ブラックホールへつながる螺旋状の磁場が物質を押し返せるくらい強く、物質落下とジェット噴出を交通整理しているという仮説がもっともらしいことがわかりました。

「磁気流体力学ジェットの標準モデルを強力に支持する最内縁の磁場構造が遂に確かめられました。さらに我々は、東アジアの望遠鏡群を含めた多波長電波観測により、ブラックホールスピンの制約が付けられることを期待しています。」と、EHT コラボレーションメンバーで、10 年以上に渡り M87 ジェットを研究してきた八戸工業高等専門学校の中村雅徳准教授は述べています。

M87 銀河の心臓部を観測するために、EHT プロジェクトは世界中の 8 つの望遠鏡をつないで仮想的な地球サイズの望遠鏡を作りました。EHT は、月面のゴルフボールの大きさを測定できるのと同程度の解像度を持っています。これにより、ブラックホール・シャドウとその周りのリング構造を直接観測することができ、新たな偏光画像はそこに磁化されたガスがあることを明確に示しています。結果は本日、EHT プロジェクトによる 2 本の論文として、専門誌「アストロフィジカル・ジャーナル・レターズ」に掲載されました。この研究には、世界中の研究機関や大学から 300 人を超える研究者が参加しました。

「EHT は急速な進歩を遂げており、ネットワークの技術的アップグレードが行われ、新たな観測所が加わっています。将来の EHT 観測により、ブラックホール周辺の磁場構造がより正確に明らかになり、ブラックホール近傍の高温ガスの物理を詳しく知ることができると期待しています。」と語ったのは、EHT のメンバーであり、台北の中央研究院天文及天文物理学研究所のジョンホ・パク東アジア天文台フェローです。

EHT プロジェクトには、理論解析班に東北大学学際科学フロンティア研究所の當真賢二准教授（理学研究科兼務）が参加しています。

参考情報

EHT プロジェクトには、アフリカ、アジア、ヨーロッパ、北アメリカ、南アメリカから 300 名以上の研究者が参加しています。EHT に参加する望遠鏡は、アルマ望遠鏡、APEX（以上、チリ）、IRAM 30m 望遠鏡（スペイン）、IRAM NOEMA 観測所（フランス）、ジェームズクラークマクスウェル望遠鏡、サブミリ波干渉計（以上、米国ハワイ州）、サブミリ波望遠鏡、キットピーク 12m 望遠鏡（以上、米国アリゾナ州）、大型ミリ波望遠鏡（メキシコ）、グリーンランド望遠鏡（デンマーク）、および南極点望遠鏡です。これらの望遠鏡で同時に同じ天体を観測し、そのデータを後から結合して一つの巨大な仮想望遠鏡を構成する「超長基線電波干渉法（Very Long Baseline Interferometry）」という技術を用いています。これにより、EHT は 20 マイクロ秒角（1 マイクロ秒角は角度の 1 度の 36 億分の 1）という高い解像度を実現します。

EHT コンソーシアムは、以下の 13 の機関が参加しています。中央研究院天文及天文物理研究所（台湾）、アリゾナ大学（米国）、シカゴ大学（米国）、東アジア天文台、ゲーテ（フランクフルト）大学（ドイツ）、マサチューセッツ工科大学ヘイスタック観測所（米国）、ミリ波電波天文学研究所（フランス、スペイン）、アルフォンソ・セラノ大型ミリ波望遠鏡（メキシコ）、マックスプランク電波天文学研究所（ドイツ）、自然科学研究機構国立天文台（日本）、ペリメーター研究所（カナダ）、ラドバウド大学（オランダ）、スミソニアン天体物理学観測所（米国）

論文情報

この成果は、2019 年 4 月に発表された成果（論文 1~論文 6）に続く、EHT プロジェクトによる研究成果です。本日 2021 年 3 月 24 日、アストロフィジカル・ジャーナル・レターズ（*The Astrophysical Journal Letters*）から 2 編の論文として公開されました。

論文 7: Polarization of the ring

DOI: <https://doi.org/10.3847/2041-8213/abe71d>

論文 8: Magnetic Field Structure Near The Event Horizon

DOI: <https://doi.org/10.3847/2041-8213/abe4de>

なお、本成果に関連して、EHT による偏光観測の中で、アルマ望遠鏡単独の観測データを解析した結果も、上記 2 編の論文と同時に出版されています。

"Polarimetric properties of Event Horizon Telescope targets from ALMA"

DOI: <https://doi.org/10.3847/2041-8213/abee6a>

巨大地震発生箇所のプレート下に異常構造を発見

—構造異常体が巨大地震の発生に影響—

2021年4月23日 附属地震・噴火予知研究観測センター 教授 趙 大鵬

発表のポイント

- マグニチュード(以下、M)9.0以上の巨大地震が起きた6つの地域の詳細な3次元地震波速度構造(注1)を調べた。
- 沈み込むプレート下の異常構造が巨大地震の発生に影響を及ぼしたことを初めて発見した。
- 巨大地震発生メカニズムの解明およびその震源位置と破壊範囲の予測の重要な手がかりとなる。

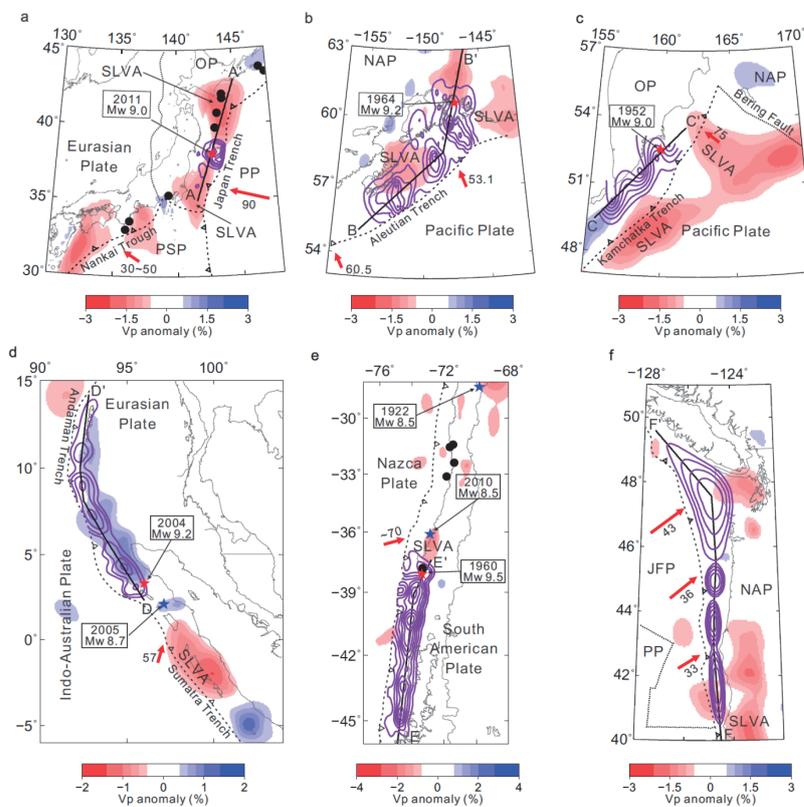


図1.6つの巨大地震(M_≥9.0)が起きた地域における沈み込むプレート(スラブとも呼ぶ)下のP波速度分布(カラー)と巨大地震の地震時すべり分布(紫色のコンター線)。(a)日本、(b)アラスカ、(c)カムチャッカ、(d)スマトラ、(e)チリ、(f)カスカディア(北米西海岸)。赤色と青色はそれぞれP波の低速度と高速度の部分で、速度異常のスケールを各地図の下に示す。★(赤星)は巨大地震(M_≥9.0)の震央(破壊の開始点)。★(青星)はM 8.5-8.9の地震の震央。●はM 8.0-8.4の地震の震央。点線は海溝軸。赤矢印と数値は海洋プレート沈み込みの方向と速さ。JFP: Juan de Fucaプレート、NAP: 北米プレート、OP: オホーツクプレート、PP: 太平洋プレート、PSP: フィリピン海プレート、SLVA: スラブ下の低速度異常体。

概要

M9.0以上の巨大地震の発生メカニズムについてこれまで数多くの研究が行われましたが、多くの未解明な点が残されています。東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予知研究観測センターの趙大鵬教授と Jianke Fan 博士 (PD 研究員、現在は中国科学院青島海洋研究所 准教授) は、地震波トモグラフィー法(注2)を用いて、これまでに M9.0以上の巨大地震が起きた、日本列島を含む世界の6つの沈み込み帯の地下の詳細な3次元地震波速度構造を調べました。その結果、沈み込んでいる海洋プレート下のマントルに顕著な低速度異常体(注3)が存在することを明らかにしました。これらの低速度異常体の位置と、巨大地震の震源位置や破壊範囲に顕著な関連性が見られ、異常体の存在が巨大地震の発生や範囲に影響を及ぼしたと推測できます。本

研究成果は、巨大地震発生メカニズムの解明およびその震源位置と破壊範囲の予測への重要な手がかりとなります。本成果は、英科学誌「*Nature Geoscience*」に4月27日（日本時間）に論文としてオンライン掲載されました。

詳細な説明

地震の大きさ（マグニチュード、M）を精確に決定できる地震計が発明された1880年代から今日まで、世界でM9.0以上の巨大地震が5つ発生しました。それは、1952年M9.0カムチャッカ地震、1960年M9.5チリ地震、1964年M9.2アラスカ地震、2004年M9.2スマトラ地震、2011年M9.0東北地方太平洋沖地震です。また、正確な震源位置が不明ですが、1700年にM9.0クラスのカスカディア地震がアメリカとカナダの西海岸で起こったと言う研究結果があります。これら6つの巨大地震は全て沈み込み帯（海洋プレートが大陸プレートの下に沈み込んでいる地域）で発生しました。

巨大地震の発生メカニズムについて、これまで数多くの研究が行われましたが、そのほとんどが沈み込む海洋プレート（スラブとも呼ぶ）の上面付近やスラブの上盤側のプレートの構造と応力場^(注4)に関するものです。一方、スラブの下側の構造と巨大地震との関係に関する研究はほとんどありませんでした。

本研究で趙教授の研究グループは、独自に開発した世界最先端の地震波トモグラフィ法を用いて数百万の地震波観測データからなるビッグデータを解析し、巨大地震が起った6つの沈み込み帯地域の地殻・上部マントルの詳細な3次元P波速度構造を調べました。その結果、以下のような新知見を得ました。

- ① スラブ下のマントルに顕著なP波速度の遅い（低速度）異常体(SLVA)が存在する（図1）。これは、熱いマントル上昇流を反映すると思われる（図2）。
- ② 巨大地震の震源（つまり、破壊の開始点）はSLVAの端部や複数のSLVAの間（SLVAギャップ）の真上に位置する（図1と図2）。
- ③ 巨大地震の地震時すべり（つまり、破壊の範囲）は主にSLVAギャップの真上に分布する（図1と図2）。
- ④ SLVAとSLVAギャップの浮力の違いが巨大地震発生の一因となる。
- ⑤ 巨大地震の発生には、スラブ上面付近や上盤プレートの構造と応力場だけでなく、スラブ下の不均質構造も影響を及ぼすと推定できる。

本研究の成果は、巨大地震発生メカニズムの解明およびその震源位置と破壊範囲の予測の重要な手がかりになると考えられます。

本研究は文部科学省科学研究費補助金（課題番号19H01996）の支援を受けて行われました。また、東北大学災害科学研究拠点からの研究費の支援も受けました。

用語解説

（注1）地震波速度構造

地震波速度とは地震波が地球の中を伝わる速さのことです。地震波には、性質の違うP波とS波があります。地震波速度は場所によって異なり、だいたい地中深くなるほど速くなります。地球の内部構造や状態を表すには幾つかの物理量（例えば、密度、温度など）を使うことができますが、現在は地震波速度の分布が最もよく用いられています。また、地震波トモグラフィ

一法を使って、地球内部における P 波（あるいは S 波）速度の 3 次元分布を推定でき、得られた結果は 3 次元 P 波（あるいは S 波）速度構造と言います。地震波速度の分布から、地球内部の密度、温度、強度などに関する情報も得られるため、P 波（あるいは S 波）速度の空間分布を使って、地球内部構造を表します。

（注 2）地震波トモグラフィ法

コンピュータで大量の地震波伝播時間のデータを処理することによって、地球内部の 3 次元地震波速度分布を求める方法です。その原理は医学分野の CT スキャンと同じです。周囲よりも高速度の地域を青色、低速度の地域を赤色で示します。高速度域は低温で硬い岩石、低速度域は高温で柔らかい岩石に対応します。

（注 3）低速度異常体

周囲に比べて地震波速度が小さくなる部分です。高温や流体を含むなどの成因によって、周りより軽くなり、浮力で上昇できます。例えば、活火山下のマグマ溜まりは顕著な低速度異常体です。

（注 4）応力場

地層にどのような力が加わっているかを示すもので、水平方向を基準にして押されていれば圧縮応力場、引っ張られていれば引張応力場と言います。応力場の変化は、プレートの運動に関係しています。特に日本のような沈み込み帯では、海洋プレートの沈み込みの方向と角度が応力場を変化させると考えられています。

論文情報

雑誌名： *Nature Geoscience*

論文タイトル： Subslab heterogeneity and giant megathrust earthquakes

著者： Jianke Fan, Dapeng Zhao

URL： <https://dx.doi.org/10.1038/s41561-021-00728-x>

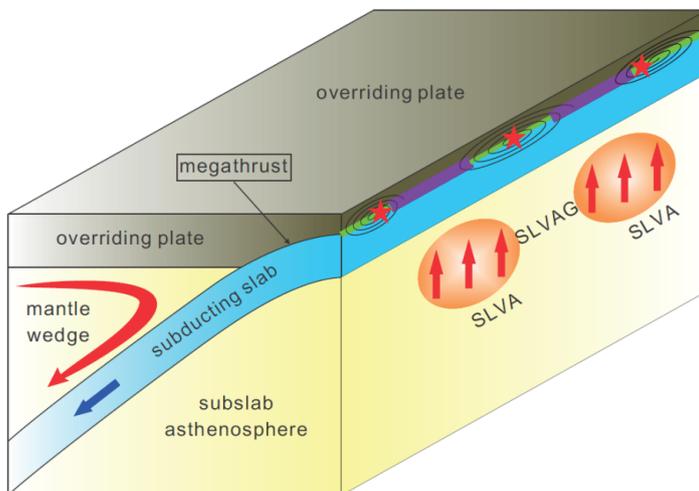


図 2. 本研究の結果を示す模式図。沈み込んでいる海洋プレート(スラブとも呼ぶ)と上盤の大陸プレートをそれぞれ青色と灰色で示す。★は巨大地震 ($M \geq 9.0$)の震源(破壊の開始点)。黒色のコンター線は巨大地震の破壊範囲。SLVA: スラブ下の低速度異常体のギャップ。SLVAG: スラブ下の低速度異常体。紫色と緑色の太い線はそれぞれ SLVA と SLVAG の上方にある断層面 (megathrust) 上の部分。本研究によって、巨大地震の発生ならびに破壊範囲は SLVAG の上部であり、SLVA の上部ではないと推測される。

金星大気中の自発的な波の励起を初めて再現

ー地球シミュレータを用いた世界最高解像度のシミュレーションー

2021年6月17日 地球物理学専攻 助教 黒田 剛史

発表のポイント

- スーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を駆使して、世界最高解像度で金星大気大循環モデルのシミュレーションを実現しました。
- 惑星規模の熱潮汐波^(注1)から、小規模な大気重力波^(注2)が自発的に励起されることを示し、そのメカニズムを解明しました。
- 地球大気中で見られるジェット気流や低気圧からの大気重力波の自発的な励起^(注3)は、金星大気中ではより大規模な惑星規模の熱潮汐波から生じることを示しました。
- 今後、金星探査機「あかつき」によって、この新たな現象の観測が期待されます。また、波の働きを調べることで金星気象学が革新的に進むと期待されます。

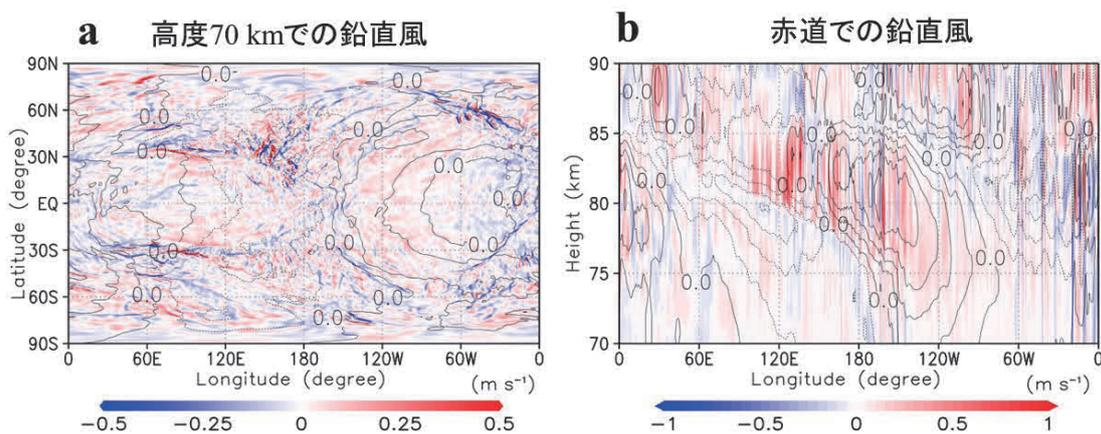


図1：鉛直速度（カラー）とジオポテンシャル高度の擾乱（等値線）のスナップショット：(a) 高度70kmでの経度緯度断面図、(b) 赤道での経度高度断面図。等値線で示す惑星規模の熱潮汐波による温位面の歪みから、カラーで示す細かい大気重力波が自発的に励起されている。暖色が上昇流、寒色が下降流を表す。(Nature Communications誌掲載論文の図を一部修正。CC BY 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

概要

東北大学大学院理学研究科の黒田剛史助教らの研究チームは、金星の大気の流れをシミュレーションする大気大循環モデル「AFES-Venus」^(注4)を、地球シミュレータ^(注5)を用いて世界最高解像度で走らせ、小規模な波の自発的な励起を再現しました。

金星は厚い雲層によって全体を覆われており、大気内部の運動についてはほとんどわかっていません。また、大気大循環モデルを用いた金星大気運動の数値シミュレーションが試みられていますが、天気予報で行われているような高解像度のシミュレーションはこれまでありませんでした。今回の研究では、金星大気全体を20kmの水平刻み幅で計算することで、惑星規模の波からの小規模な波が自発的に励起されることを見出し、そのメカニズムを明らかにしました。今後は、本研究で再現された小規模な波やその励起過程の金星探査機「あかつき」^(注6)による観測が期待されるとともに、励起された波の働きを詳しく調べることで、金星に吹く風の謎の解明が大きく進むと期待されます。

本研究の成果は、英国ネイチャー・パブリッシング・グループ(NPG)発刊の国際学術雑誌 *Nature Communications* に、2021年6月18日付(英国時間)のオンライン版で公開されました。

研究背景

金星は地球の姉妹星と称されます。太陽系内で大きさと重力がもっとも地球に似た惑星のためです。しかし、金星の風や気温は地球とは大きく異なっています。金星は自転が遅く、243日で一周しますが、上空では大気全体が自転を追い越す高速回転をしています。高度70kmでは自転速度の60倍(時速360km)にも達し、「大気スーパーローテーション(超回転)」と呼ばれています。また、気温は地表付近で摂氏460度にも達します。

高温のため、大気に突入する観測はたいへん困難です。また、金星全体は高度45~70kmにある硫酸の厚い雲に覆われているので、地上望遠鏡や金星を周回する探査機からの観測も限られています。このため、地球や火星に比べて、金星大気に関する理解は遅れていました。けれども、金星の気象の解明は、地球の気象の特殊性や普遍性についての理解を深めるための重要な一歩なのです。

日本の金星探査機「あかつき」は、2015年12月に金星周回軌道に到着し、様々な観測を実施しています。紫外線や赤外線を用いた画像から、これまで知られていなかった金星特有の気象が明らかになりつつあります。

気象の研究には、数値シミュレーションも重要です。大気の状態を記述する物理法則(方程式)をコンピュータで計算し、風や気温の状態や変化を調べることができます。地球では、日々の天気予報や地球温暖化の予測などに活用されています。観測が少ない金星では、数値シミュレーションによる研究が重要ですが、観測が少ないと再現性の確認も難しくなります。また、金星大気の細かな構造を表現するには、高性能なスーパーコンピュータの利用も必要です。

本研究グループでは、あかつきが観測を始める前から、金星大気の数値シミュレーションを行う、金星大気大循環モデル「AFES-Venus」の開発を進めてきました。海洋研究開発機構のスーパーコンピュータ「地球シミュレータ」を利用し、金星大気の小規模な現象を再現できます。その結果、現実的なスーパーローテーションを再現¹⁾、維持²⁾し、これまでの観測で発見されてきた周極低温域³⁾や雲の巨大な筋状構造⁴⁾を再現、その生成メカニズムを解明し、さらに金星大気データ同化システムの開発⁵⁾に着手しその有効性を示す、世界初となる様々な研究成果を挙げてきました。

研究内容・成果

本研究では、AFES-Venusによる世界最高解像度の金星大気の数値シミュレーションを実施しました。金星大気を3次元の網目に区切る間隔は、最高で水平方向に20km毎、上下方向に250m毎で、約4.8億点の格子点の上で、大気の状態や変化を調べることができます。

その結果、現実的なスーパーローテーション(東西風)の中に、小規模な大気重力波(水平波長~250km程度)が自発的に励起されていることが見つかりました(図1a)。大気重力波が中緯度(緯度30-60度付近)で励起されていることは、これらの緯度帯にジェット気流や低気圧が存在する点で、地球で生じるジェットの出口での自発的な励起(6,7)と共通性があります。一方で、低緯度にはこのような励起源は存在しません。赤道での断面を見ると、大規模な惑星規模の熱潮汐波の構造に伴って、大気重力波が自発的に励起されていることがわかりました(図1b)。

熱潮汐波による大気重力波の自発的な励起メカニズムを図2に示します。熱潮汐波は、赤道域ではスーパーローテーション中に加速・減速（ジェット）領域を二つずつ持っていますが、ここでは簡単に説明するため、片方の領域だけを示します。1つ目のメカニズムは、熱潮汐波の加速・減速による自発的な励起です（図2a）。熱潮汐波による加速と減速は、ジェット気流の入口と出口に対応します。ジェット気流の中心では、大気は圧縮されるため、鉛直運動が生じます。これが波源となって、自発的に大気重力波が励起されます。2つ目のメカニズムは、熱潮汐波がもたらす温位面の歪みによる自発的な励起です（図2b）。ジェット気流付近では、ベルヌーイ効果^(注7)により歪んだ温位面^(注8)が山（あるいは谷）のように振る舞います。この面に沿った流れによって鉛直流が生じます。この鉛直流が波源となって、自発的に大気重力波が励起されます。

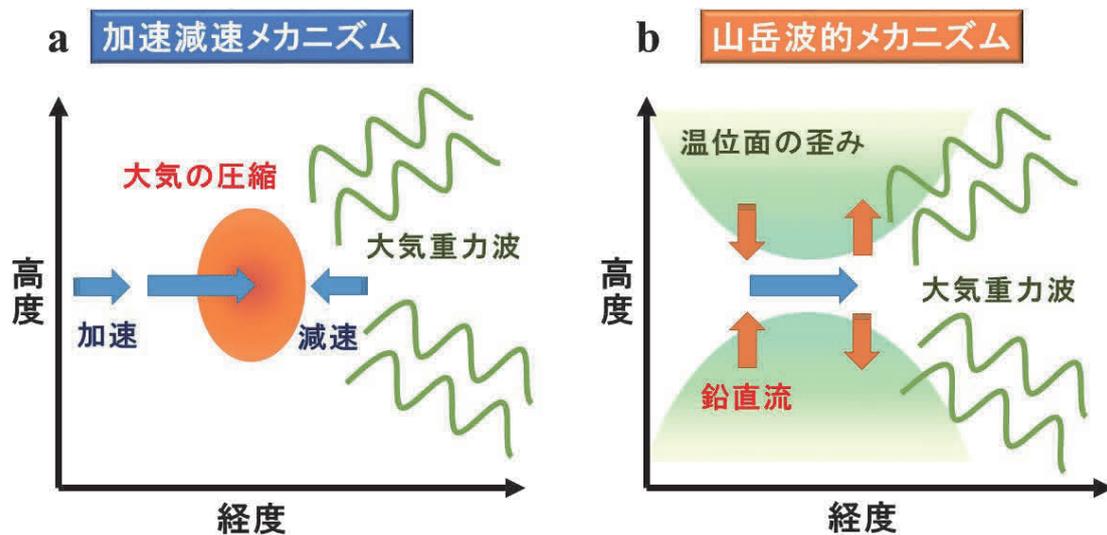


図2：大気重力波の励起メカニズム：（a）熱潮汐波によって形成された加速・減速領域によって大気が圧縮され、鉛直運動から大気重力波が励起されます。（b）熱潮汐波によって温位面が山（もしくは谷）のように歪み、山岳波のように鉛直流から大気重力波が励起されます。

図3の等値線はジェットの加速・減速を示しています。また、図1の等値線は温位面の歪みに対応します。これらの領域で、大気重力波が自発的に励起されていることが確認できます。最後に、これらの大気重力波がもたらす運動量の輸送（図3a）とスーパーローテーション（東西風）の加速・減速（図3b）を明らかにしました。これまで、熱潮汐波による加速・減速がスーパーローテーションの形成や維持に重要であることが示唆されてきました。一方で、今回発見された小規模な大気重力波は、その励起領域で熱潮汐波の加速・減速を半分程度打ち消す働きを持っていることがわかりました。また、上方に伝播し、そこでも同程度の加速・減速をもたらすことがわかりました。このことは、これまで考えられてこなかった小規模の大気重力波が、金星大気中でスーパーローテーションの形成や維持に大きな働きをもたらすことを強く示唆しています。

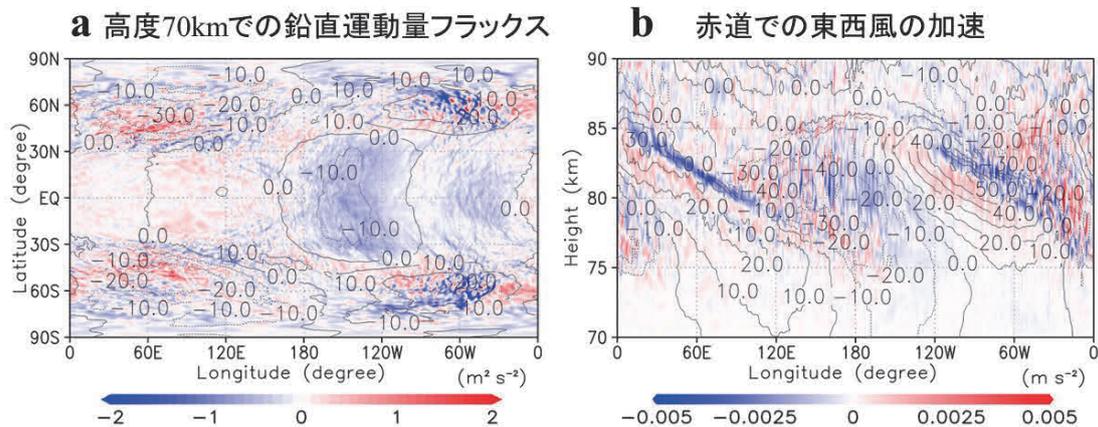


図3：(a)鉛直運動量フラックス(カラー)と(b)東西風の加速(カラー)、東西風速の擾乱(等値線)の合成図：(a)高度70kmでの経度緯度断面図、(b)赤道での経度高度断面図。等値線で示す惑星規模の熱潮汐波の加速・減速領域(ジェットの出口)から、カラーで示す細かい大気重力波が自発的に励起され、熱潮汐波による加速・減速を打ち消す働きをするとともに、鉛直運動量を輸送し、上空での加速・減速をもたらしている。太陽直下点を中心に移動させて、時間平均を行った図です。(Nature Communications 誌掲載論文の図を一部修正。CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

今後の展開

本研究では、金星大気を世界最高解像度で数値シミュレーションすることで、地球大気で生じるジェットの出口からの自発的な大気重力波の励起が、金星大気でも生じていることを示しただけでなく、金星では熱潮汐波という惑星規模の波動から大気重力波の自発的励起が生じることを初めて示し、そのメカニズムの解明を行いました。AFES-Venusは過去に観測された金星大気の様々な現象を再現している点でも、今回シミュレートされた現象が実際の金星で発生している可能性が高いと考えられます。

今後は、本研究で新たに発見された小規模な大気重力波やその励起過程が、金星探査機「あかつき」によって観測されることが期待されます。あかつきの紫外線画像では、今回の研究で大気重力波が励起されている、雲層上端の高度70km付近を観測することができます。金星に近づくタイミングでは、高分解能の画像が取得できるため、小規模な波の構造を捉えられる可能性があります。また、励起された波の動きをモデルや観測でさらに詳しく調べることで、特にデータ同化の手法を活用することで、金星に吹く風の謎の解明が大きく進むと期待されます。

これまでの金星気象学は、観測データもシミュレーションも時間、空間分解能が低く、小規模で時間変動の大きな現象の理解は進んでいませんでした。本研究は、AFES-Venusの高解像度シミュレーションを用いることで、金星気象学を、細かく速い現象への議論が可能な、新たな段階に引き上げたと言えます。今後も、あかつきとの連携によって、地球の姉妹星でありながら、分厚い硫酸雲のベールに包まれた、金星気象の謎が解き明かされることが期待されます。

謝辞

本研究は地球シミュレータ利用課題「AFESを用いた地球型惑星の大気大循環シミュレーション」及び「AFESを用いた金星・火星大気の高解像度大循環シミュレーション」の一環として実施しました。また、日本学術振興会科学研究費助成事業 19H01971, 19H05605, 20K04062,

20K04064 の助成をうけて実施されました。AFES-Venus の高解像度計算には、海洋研究開発機構の地球シミュレータを使用しました。

原論文情報

Generation of gravity waves from thermal tides in the Venus atmosphere,
N. Sugimoto, Y. Fujisawa, H. Kashimura, K. Noguchi, T. Kuroda, M. Takagi, and Y.-Y. Hayashi,
Nature Communications, (2021), DOI: 10.1038/s41467-021-24002-1

参考文献

- (1) Fully developed super-rotation driven by the mean meridional circulation in a Venus GCM, N. Sugimoto, M. Takagi, and Y. Matsuda, *Geophysical Research Letters*, Vol.46, (2019), p1776–1784
- (2) Waves in a Venus general circulation model, N. Sugimoto, M. Takagi, and Y. Matsuda, *Geophysical Research Letters*, Vol.41, (2014), p7461–7467
- (3) The puzzling Venusian polar atmospheric structure reproduced by a general circulation model, H. Ando, N. Sugimoto, M. Takagi, H. Kashimura, T. Imamura, and Y. Matsuda, *Nature Communications*, Vol. 7, (2016), 10398.
- (4) Planetary-scale streak structure reproduced in high-resolution simulations of the Venus atmosphere with a low-stability layer, H. Kashimura, N. Sugimoto, M. Takagi, W. Ohfuchi, T. Enomoto, K. Nakajima, M. Ishiwatari, T. M. Sato, G. L. Hashimoto, T. Satoh, Y. O. Takahashi, and Y.-Y. Hayashi, *Nature Communications*, Vol.10, (2019), 23.
- (5) Development of an ensemble Kalman filter data assimilation system for the Venusian atmosphere”, N. Sugimoto, A. Yamazaki, T. Kouyama, H. Kashimura, T. Enomoto, and M. Takagi, *Scientific Reports*, Vol.7, (2017), 9321.
- (6) A theoretical study on the spontaneous radiation of inertia-gravity waves using the renormalization group method. Part I: Derivation of the renormalization group equations, Y. Yasuda, K. Sato, and N. Sugimoto, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol.72, No.3, (2015), p957–983
- (7) Generation and backreaction of spontaneously emitted inertia-gravity waves, N. Sugimoto and R. Plougonven, *Geophysical Research Letters*, Vol.43, (2016), p3519–3525

用語説明

(注 1) 熱潮汐波

太陽が加熱する領域が移動することによって大気中に励起される惑星規模の波。地球にも昼間熱せられ、夜冷却されることにより、一日および半日周期の潮汐波が励起される。金星にも熱潮汐波が存在することが観測からわかっている。地球の海では、潮の満ち引きに関わる潮汐が存在するが、これは月の引力によって生み出されるもので、別物である。

(注 2) 大気重力波

浮力を復元力とする小規模（波長数十～数百 km）な波。山岳を波源とする地形性と、ジェット、前線、対流などを波源とする非地形性に分けられる。地球では、重力波を含む大気波動は、鉛直上方に運動量を輸送し、中層大気の大循環を駆動する働きを担っている。

(注 3) 自発的放射

非地形性重力波の放射過程の一つ。総観規模（数千 km）の流れ自体から、その時間発展とともに重力波が放射される。大気（波の媒質）自体が波源となるため、物理的理解が難しい。

（注4） 大気大循環モデル「AFES-Venus」

金星大気全体の数値シミュレーションを実施するための計算プログラム。地球大気シミュレーション用プログラム「AFES（Atmospheric GCM For the Earth Simulator）」を、金星大気用に改修したものである。大気大循環モデルでは、コンピュータプログラムにより、流体力学や熱力学の方程式を基に、大気の流れや温度・湿度の変化を計算する。大気大循環モデルを用いて数日から経年スケールの大気現象をシミュレートし、メカニズムや予測可能性が調査できる。AFESやAFES-Venusは地球シミュレータの性能を最大限活用できるように最適化されており、地球シミュレータ上で動かすことで、世界最高レベルの高解像度シミュレーションを実現できる。

（注5） 地球シミュレータ

海洋研究開発機構に設置されたスーパーコンピュータシステム。ベクトル型の大型計算機としては世界最高レベルの性能を誇る。2002年に初代地球シミュレータの運用が開始されて以降、システムが3度更新され、現在は4世代目の運用が開始された。

（注6） あかつき

日本の金星探査機。金星大気の謎を解明するために開発され、日本の惑星探査機として初めて地球以外の惑星を回る軌道に入ることに成功した。2010年5月21日に打ち上げられたが、2010年12月7日に金星の周回軌道投入に失敗し、金星に近い軌道で太陽を周回した。2015年12月7日に金星周回軌道への投入を再び試み、成功した。観測波長の異なる5台のカメラと電波遮蔽観測用の超高安定発振器を搭載し、金星の大気を立体的に観測している。

（注7） ベルヌーイ効果

流体の流れが速い程、その場所の圧力が低下する。ジェットの中心など流れが速い部分では、温位面上の圧力が低下して、面の間隔が狭くなる。

（注8） 温位面

温位の一定面。温位とは、空気塊を断熱的に地表面（地球では1000 hPa面）まで移動させた時の温度のこと。近似的な保存量である。

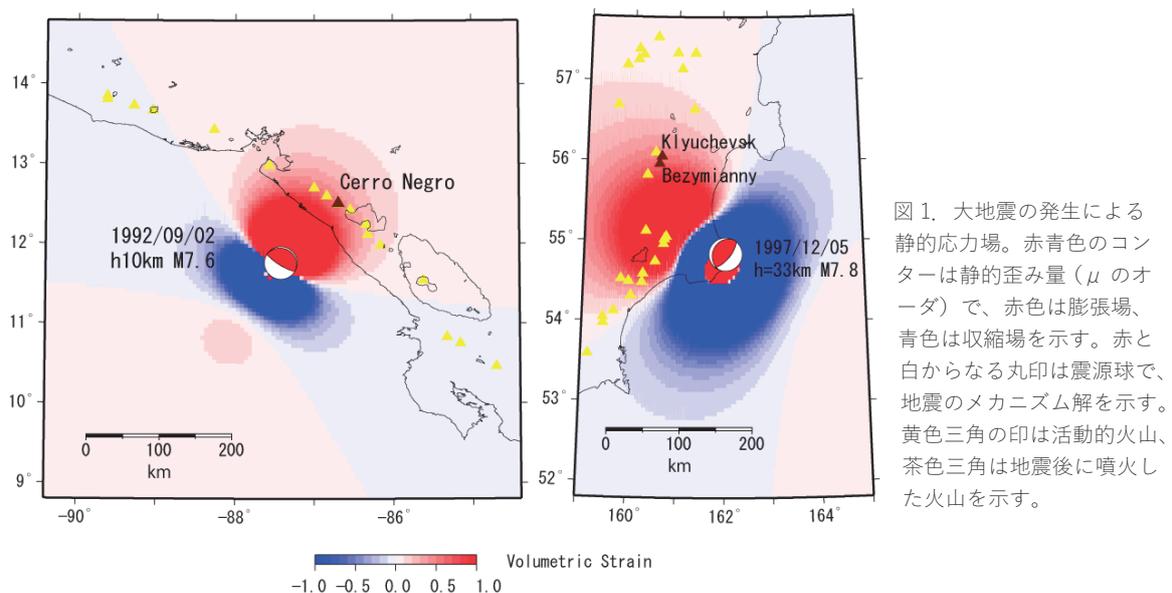
大地震によって誘発される火山噴火

火山噴火が誘発されるメカニズムと噴火発生頻度を提示

2021年8月27日 地球物理学専攻 教授 西村 太志

発表のポイント

- 地震と火山噴火について、信頼性の高い世界規模のデータベースを解析し、大地震による火山噴火の誘発メカニズムを明らかにした。
- 大地震発生の応力解放によって膨張を受ける火山では、マグマ内の気泡成長などによりマグマ上昇が促され、噴火が発生しやすくなることを示した。
- 誘発メカニズムの一つとして考えられていた強震動は、それだけでは火山噴火を誘発するとは言えないことを明らかにした。
- 0.5μ (マイクロ、マイクロは10の-6乗) strain以上の膨張場となる火山では、大地震の発生から10年ほどの間は火山噴火の発生頻度が2-3倍高まることを示した。
- 大地震が発生した際には周辺火山の歪み場を計算することで、誘発される火山噴火に備えることができる。



概要

大地震が発生すると火山噴火が誘発されることはよく知られていますが、その発生メカニズムは不明でした。東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻西村太志教授は、地震と火山噴火について、信頼性の高い世界規模のデータベースを解析することにより、火山噴火が誘発されるのは、大地震の応力解放により 0.5μ strain 以上の膨張場となる火山であること、噴火の発生頻度は大地震発生後10年ほどの間、2-3倍高まることを世界で初めて示しました。この解析結果は、大地震が発生した際に火山体を受ける歪み場を計算することにより噴火が誘発される可能性のある火山を把握し、火山災害の発生に備えることができることを示しています。

本研究成果は、2021年8月26日に、*Scientific Reports*に掲載されました。

詳細な説明

1707年の宝栄地震（M8クラス）の発生から49日後に富士山が噴火したり（宝永噴火）、フィリピンではM7.8ルソン地震の約1年後に20世紀最大の噴火といわれる1991年ピナツボ噴火が発生したりしたように、大地震が発生すると近くの火山が噴火することはよく知られていました。このように大地震が火山噴火を誘発するのは、大地震によって強く揺すられ、断層の応力解放に伴い火山体が膨張あるいは圧縮を受けることにより、地下のマグマや火道に変化が生じるためと考えられてきました。しかし、その主要因は明らかでなく、誘発メカニズムは長年議論の対象となってきました。そこで本研究は、信頼性の高い世界規模のデータベースを用いて、強震動の大きさや応力解放に伴う静的歪み場の内、どの要因によって火山噴火が誘発されているのかを調べました。

地震のデータは、1976年から世界規模の地震観測によって整備された、信頼性の高いGlobal CMT カタログを利用しました。火山噴火の誘発を調べるため、大地震発生前後10年間の噴火記録（米国スミスソニアン博物館 Global Volcanism Program による）を抽出し、35年間

（1976-2010年）の地震データおよび55年間（1966-2020年）の火山噴火データを解析しました。なお、漏れなく記録されている、マグニチュード5以上の地震、火山爆発指数（VEI）^(注1)が2以上の中規模以上の噴火のみを解析対象としました。

大地震により励起される強震動の大きさは、地震のマグニチュードと火山までの距離などから求められている経験式で求められます。また、地震波の通過後も残る静的歪み場^(注2)は、地震のメカニズム解をもとにして理論的に計算することができます（図1）。

そこで、それぞれの大地震に対して、周辺の火山が受けた強震動の大きさや静的歪み場の大きさを条件として火山噴火のデータを分類します。さらに、それぞれの大地震の発生した時間をゼロとして、±10年間の噴火発生数を調べました（図2）。その結果、静的収縮場になった場合や強い強震動を受けた場合には顕著な噴火数の変化は見られないことがわかりました。一方、静的な歪み場が 0.5μ strain以上の膨張場になった場合には、大地震の発生後の約10年間、噴火の発生数が増えることがわかりました。噴火の発生数は、大地震の前の約2-3倍になります。膨張場となった火山で噴火数が増えたのは、気泡成長によってマグマが浮力を獲得する、あるいは、火道の閉塞が緩むことにより、マグマ上昇が起き易くなったためと推察されました。

火山の噴火履歴を調べた結果、噴火を頻繁に起こしている火山の方が誘発されやすい傾向があるものの、静穏期の長い火山でも噴火が誘発されていることがわかりました。また、大地震により静的歪みが 0.5μ strain以上の膨張場となるのは、世界で年間2-3火山であり、そのうちの15-25%でVEI 2以上の噴火が発生すると見積られました。この数はそれほど大きくありませんが、VEI 1の小規模な噴火の発生頻度はVEI 2の約7倍であるので、大地震の発生により噴火が発生する可能性は、この見積もりよりは大きくなると指摘しました。

謝辞

コロンビア大学によるGlobal CMT地震データカタログおよびスミスソニアン博物館（米国）のGlobal Volcanism Programの火山噴火データベースを利用しました。本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献する地震火山観測研究計画（第二次）」および「次世代火山研究・人材育成総合プログラム」、東北大学「災害科学世界トップレベル研究拠点」の支援を受けました。

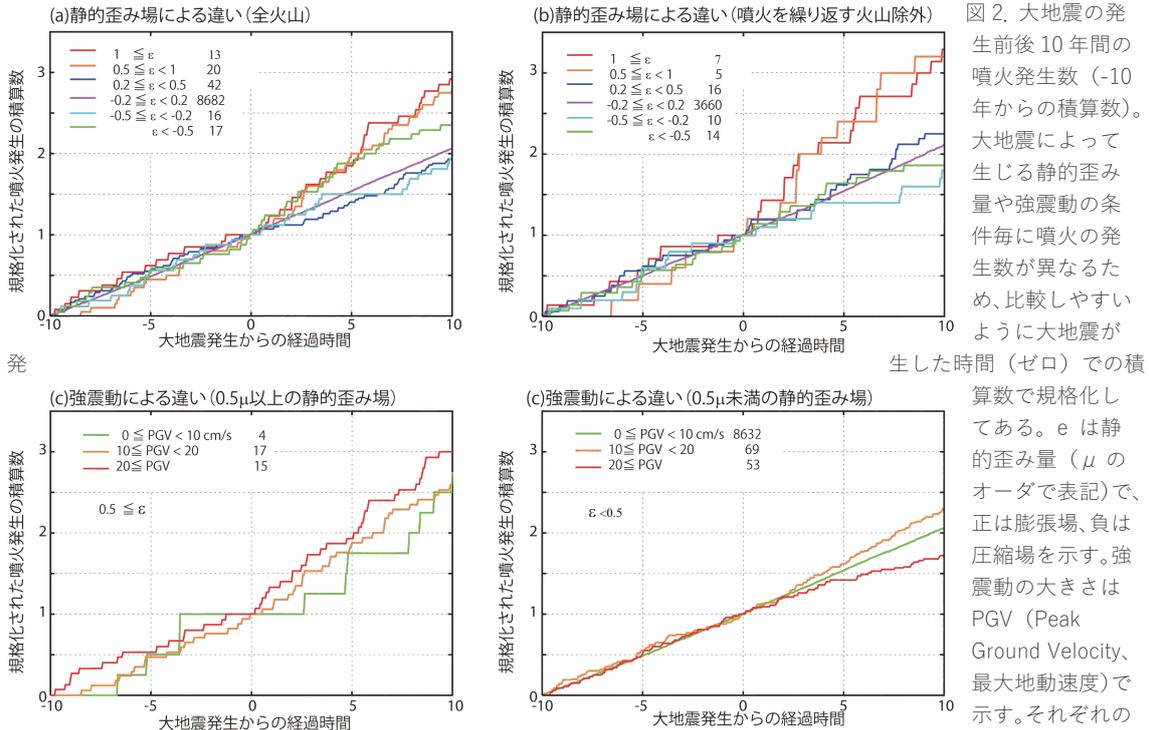


図2. 大地震の発生前後10年間の噴火発生数（-10年からの積算数）。大地震によって生じる静的歪みや強震動の条件毎に噴火の発生数が異なるため、比較しやすいように大地震が生じた時間（ゼロ）での積算数で規格化してある。eは静的歪み量（ μ のオーダーで表記）で、正は膨張場、負は圧縮場を示す。強震動の大きさはPGV（Peak Ground Velocity、最大地動速度）で示す。それぞれの

場合分けの右側の数字は、噴火の発生総数を示す。(a)静的歪み場による違い（全火山を対象）。(b)静的歪み場による違い（噴火発生頻度の高い火山を除いた場合）。(c)強震動による違い（ 0.5μ strain以上の静的歪み場）。(d)強震動による違い（ 0.5μ strain未満の静的歪み場）。(a)(b)に見られるように、静的歪み場が 0.5μ strain以上の場合（赤色・橙色）に大地震発生後にグラフの傾きが大きくなる、つまり噴火発生数が増える。

語句説明

(注1) 火山爆発指数 (VEI; Volcanic Explosivity Index)
 火山噴火の規模を示す指数のひとつで、噴煙高度や噴出物量などから決められる。概ね、VEI1は小規模噴火、2-3は中規模噴火、4-5は大規模噴火、5以上は巨大噴火噴火と言われる。20世紀最大の噴火といわれるピナツポ山1991年の噴火はVEI6、2014年御嶽山噴火はVEI2クラス。

(注2) 静的歪み場
 大地震が発生した際に、地震波が通過した後も残る歪みを、静的歪みと呼ぶ。一方、地震動のような短周期の揺れは動的歪みと呼ばれる。

論文情報

雑誌名: *Scientific Reports*
 タイトル: Volcanic eruptions are triggered in static dilatational strain fields generated by large earthquakes
 著者: Takeshi Nishimura
 DOI番号: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96756-z>
 URL: www.nature.com/articles/s41598-021-96756-z

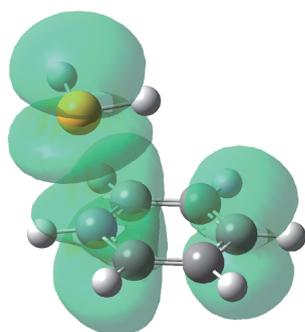
新奇的な電荷保持形態の観測

～タンパク質における電子移動を司る新しい分子間相互作用～

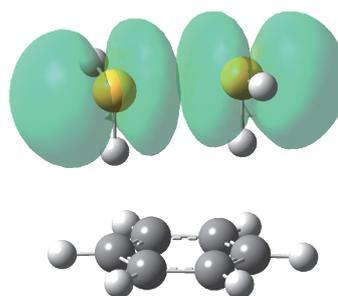
2019年8月16日 化学専攻 教授 藤井 朱鳥

概要

タンパク質中を電子が移動する際に、タンパク質を構成するアミノ酸に含まれる硫黄原子 (S) と芳香環 (π 電子) ^(注1) が共同して正電荷 (正孔) ^(注2) を受け取り、電子移動における中継点の役割を果たすという機構が提案されています。この機構においては、正電荷が硫黄原子と芳香環の双方に拡がって両者を結びつけており、これを S- π 半結合と呼んでいます。生体中で S- π 半結合を直接観測することは非常に難しいため、その性質を調べるためのモデル系が必要とされてきました。今回、気体のベンゼンと硫化水素の会合体 ^(注3) をイオン化し、これに分光計測 ^(注4) を適用することにより、両者の間に S- π 半結合が生じることを明らかにしました。この極めて単純なモデル系は、理論計算の信頼性の検証などにも非常に有用であると期待されます。



S- π 半結合を生じた
[benzene-(H₂S)₁]⁺



S-S半結合へと電荷保持形態が
変化した[benzene-(H₂S)₂]⁺

図1. ベンゼン-硫化水素会合体正イオンの電荷分布。
緑色の表面が電子が抜けて実効的に正電荷をもつ部分を示している。

研究内容

生体を構成するタンパク質が果たす様々な機能においては、電子の移動が非常に重要な役割を担っています。この電子移動における機構のひとつとして、タンパク質を構成するアミノ酸残基 ^(注5) の側鎖に含まれる硫黄原子 (S) と同じく側鎖の芳香環が共同して行う正電荷 (正孔) の授受が大きな注目を集めています。これは、S 原子と芳香環が接近して正電荷を一緒に受け取り (電子がこれまで正孔を持っていた相手側へと移動します)、正電荷が両者全体に拡がった状態を生じて安定化するというものです。S 原子と芳香環との接近傾向がタンパク質の構造解析の結果見られるため、このような機構が提案されており、正電荷を介して S 原子と芳香環 (π 電子) の間には S- π 半結合と呼ばれる特異な引力 (分子間相互作用) が働くと予想されています。しかし、タンパク質は複雑な系であるため、S- π 半結合を観測し、その性質を明らかにすることは非常に困難でした。

S- π 半結合の性質を明らかにするためには、S- π 半結合を含む単純なモデル系が必要です。そこで本研究では、最も単純な芳香族分子であるベンゼン (C₆H₆) と同じく最も単純な硫黄含有

分子である硫化水素 (H_2S) の気体状態の会合体に着目し、その正イオン (1 電子が抜けて、正孔を生じたもの) の構造を赤外分光法^(注6) と呼ばれる光を用いた構造解析手法で調べました。その結果、ベンゼン 1 分子と硫化水素 1 分子が会合したイオン $[\text{benzene}-(\text{H}_2\text{S})_1]^+$ において、正電荷が双方の分子に拡がり、S- π 半結合が生じていることが分かりました。更に、硫化水素分子の数を増やすと ($[\text{benzene}-(\text{H}_2\text{S})_n]^+$, $n = 2-4$)、正電荷が今度は硫化水素分子間で非局在化^(注7) され、ベンゼン部分では中性の状態になることが見出されました。これは、S- π 半結合と S-S 半結合 (硫化水素分子間での電荷非局在化による引力) という 2 種の異なった正電荷の保持形態が競合することを示しています。

現代の化学では、基本方程式を数値的に計算機で解くことにより、分子の様々な性質を理論的に予言することが出来ます。しかし、S- π 半結合 (および S-S 半結合) に関しては、計算結果が用いられる理論レベル (近似法) により非常に異なり、理論レベルの選択が非常に大きな問題でした。今回のベンゼン-硫化水素の系では、異なる電荷保持形態の競合を理論計算を使わずに、実験結果のみに基づいて確定する事が出来ました。すなわち、今回の実験結果を再現できる計算レベルが信頼できる計算レベルということになり、S- π 半結合を解析する上で必要となる理論水準を定めることが可能となりました。今後の理論解析において、本研究の結果が大いに利用されることが期待されます。

発表雑誌

この研究は東北大学大学院理学研究科化学専攻、理学部化学科の王丹丹(博士後期課程 3 年)、服部圭吾 (学部 4 年)、藤井朱鳥教授の研究チームが行い、英国王立化学協会発行の旗艦化学誌 *Chemical Science* に発表されました。

Dandan Wang, Keigo Hattori, Asuka Fujii, "The S: π hemibond and its competition with the S: \cdot S hemibond in the simplest model system: infrared spectroscopy of the $[\text{benzene}-(\text{H}_2\text{S})_n]^+$ ($n = 1-4$) radical cation clusters" *Chemical Science*, 2019, 10, 7260-7268.

用語説明

(注 1) 芳香環 (π 電子)

有機化合物の部分構造 (官能基) において、炭素原子 6 個が環構造を作り、(形式的に) ひとつおきに炭素原子間の結合を二重結合としたものが芳香環です。芳香環の二重結合を作る電子の一部はひとつの結合間だけでなく、芳香環上を自由に動くことが出来ます。このような電子は π 電子と呼ばれ、芳香環の性質を特徴付けます。

(注 2) 正孔

電氣的に中性であった状態から 1 電子が抜けると、電子が存在していた場所は原子核の正電荷により正に帯電してみえます。この様に、電子が抜けた結果、正電荷を帯びた部分を正孔と呼びます。付近の電子が正孔へ移動すると、移動先の正孔は正負の電荷が釣り合って消滅しますが、その電子が抜けた場所に新たな正孔が生じます。すなわち、電子の移動を正孔の移動とみなすことができ、正孔はあたかも正の電荷を持つ粒子の様に振る舞います。

(注 3) 会合体

分子の間には様々な引力 (分子間相互作用) が働き、お互いを引きつけ合います。この様な引力が熱運動を上回り、複数個の分子が安定して接触しているものを会合体と呼びます。中性の

ベンゼンと硫化水素は分子間力が弱く、室温では安定な会合体を形成しませんが、本研究では特殊な方法で非常に低温な気体を作り、熱運動を抑えて両者を会合させました。

(注4) 分光計測

分光計測とは、物質に様々な波長の光を照射し、その吸収や散乱、あるいは発光やイオン化などの光吸収後の後続過程を観測することです。光はその波長により定まるエネルギーの粒と見なせ、どのような波長の光を吸収できるかを測定することにより、物質の持つエネルギーの準位構造を知る事が出来ます。物質のエネルギー準位構造は、物質の幾何構造や運動に密接に関係しており、光を通じて、これらの情報を知る事が出来ます。

(注5) アミノ酸残基

タンパク質は様々なアミノ酸が1次的に繋がって（重合して）構成されています。タンパク質中のアミノ酸の構成単位（ $-\text{NH}-\text{CHR}^i-\text{CO}-$ ）をアミノ酸残基、 R^i 部を側鎖と呼びます。側鎖の違いがアミノ酸の違いとなります。側鎖に硫黄原子を含むアミノ酸にはシステイン（ $\text{R}^i = \text{CH}_2\text{SH}$ ）、メチオニン（ $\text{R}^i = \text{CH}_2\text{CH}_2\text{SCH}_3$ ）があり、芳香環を含むアミノ酸にはフェニルアラニン（ $\text{R}^i = \text{CH}_2-\text{C}_6\text{H}_5$ ）やチロシン（ $\text{R}^i = \text{CH}_2\text{C}_6\text{H}_4\text{OH}$ ）などがあります。

(注6) 赤外分光法

目に見える光よりも波長が長い光を赤外光と呼び、物質の赤外光吸収の波長依存性を計測するのが赤外分光法です。赤外光吸収により、分子は振動が励起されますが、振動のあり方が分子の構造に強く依存するため、赤外吸収の計測から、分子の構造に関する情報が得られます。

(注7) 非局在化

電荷を持つ粒子（電子）の存在確率が複数の化学結合を含む広い空間に拡がった状態を指します。今回はそのような非局在化した電子が抜けてしまったため、広範囲に正負の電荷がバランスされず、正電荷（正孔）が拡がったと見なせる状態になっています。

蜂の巣格子に形成される多様な化学結合

バナジウム酸マグネシウム：約半世紀来の謎を解明

2021年12月21日 物理学専攻 大学院生 上山 幸子

発表のポイント

- イルメナイト型構造^(注1)をもつバナジウム酸マグネシウムにおいて、隣接するバナジウムイオン間に新たな化学結合が形成される二量体化^(注2)を発見しました。
- 放射光X線回折実験^(注3)により、加熱・冷却で二量体が形成・消失する様子を観測しました。
- 加熱に伴って 二量体状態(固体) ⇒ バレンスボンドリキッド^(注4)(液体) ⇒ 金属(気体)と、物質の三態に相当する電子状態が存在することを見出しました。

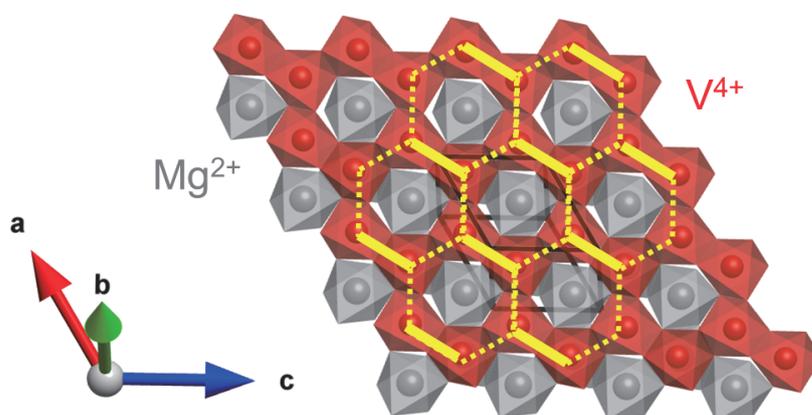


図1：本研究で決定したバナジウム酸マグネシウムの結晶構造(室温)の模式図。黄色い線はバナジウムイオンの作るハニカムを、実線はバナジウム二量体を示す。(結晶描画ソフトVESTA-3で作成。)

概要

金属酸化物などの化合物における磁性は、多くの場合、それぞれ孤立した金属イオンや陰イオン間の相互作用で説明できます。しかし一部の物質では、金属イオン間で形成される化学結合によって、この描像が成り立たなくなります。近年、金属イオン間の化学結合には二量体のほか、三量体や四量体などの多量体といったさまざまな状態があることが分かり、広く研究が進められています。

バナジウム酸マグネシウムは約半世紀前に発見された物質ですが、その化学結合状態はこれまで不明でした。東北大学多元物質科学研究所 山本孟助教、上山幸子大学院生(大学院理学研究科物理学専攻)、木村宏之教授らの研究グループは、イルメナイト型酸化物バナジウム酸マグネシウム(MgVO_3)において、蜂の巣(ハニカム)格子上で特徴的な幾何学的配置を持って、隣接するバナジウムイオンが二量体化(化学結合の形成)することを発見しました。さらに放射光X線回折測定と物性測定を行ったところ、加熱に伴い 二量体状態(固体) ⇒ バレンスボンドリキッド(液体) ⇒ 金属(気体)と、物質の三態に相当する電子状態が存在することを見出しました。

同研究グループには他に、大阪府立大学 山田幾也教授が参加しました。本成果は2021年12月17日(米国時間)に、化学分野で最も権威のある論文誌の1つ、米国化学会誌でオンライン公開されました。本論文はFront Cover Artにも選ばれました。

詳細な説明

1. 背景

遷移金属酸化物における磁性は、多くの場合、それぞれ孤立した金属イオンや陰イオンの間の相互作用で説明できます。しかし一部の物質では、金属イオン間で形成される化学結合によって、この描像が成り立たなくなります。近年、金属イオン間の化学結合には、二つの金属イオンが対を作る二量体のほか、三量体や四量体などの多様な状態があることが分かり、広く研究が進められています。

イルメナイト型酸化物バナジウム酸マグネシウム (MgVO_3) は高圧高温条件でのみ合成できる物質であり、1978年に米国の B. L. Chamberland らによって初めて報告がなされました。バナジウム酸マグネシウムは4価のバナジウムイオンがハニカム状に並んだ結晶構造を持ちます。磁気特性評価からバナジウムイオン間に何らかの結合が形成されることが予想されていましたが、当時の実験技術ではこの物質の詳細な結晶構造を明らかにすることは困難であり、バナジウムイオン間に生じる結合の詳細は不明のままでした。

2. 研究手法と成果

地球科学分野で開発が進められてきた超高压合成法^(注5)を用いて、純良な MgVO_3 サンプルを合成しました。このサンプルを用いて、兵庫県にある放射光実験施設スプリングエイト

(SPring-8) の BL02B2 ビームライン^(注6)において、高精度の粉末 X 線回折測定を絶対温度 100 ケルビンから 650 ケルビンまで行いました。このデータを用いた精密な結晶構造解析により、およそ 500 ケルビンで結晶の対称性が変化する結晶構造相転移と、それに伴うバナジウムイオンの二量体化が起こることを明らかにしました(図1)。バナジウム二量体はハニカム格子上で平行な二辺で形成され、はしご状のパターンを持つことが分かりました(図2)。X 線回折では約 500 ケルビンで二量体の形成/消失が起こる一方で、磁化率測定ではこの転移が約 600 ケルビンで見られました。この差は測定誤差よりも十分に大きいことから、500-600 ケルビンの間では二量体が液体のようにゆらぐ「バレンスボンドリキッド」が実現している可能性があります。それ以上の温度では MgVO_3 は金属状態となることから、加熱に伴って二量体状態(固体) \Rightarrow バレンスボンドリキッド(液体) \Rightarrow 金属(気体)と、物質の三態に相当する電子状態が存在すると考えることができます。

3. 研究の意義と今後の展開

本研究は、ハニカム格子と $3d$ 電子配置を持つ金属酸化物における二量体化を発見した最初の例です。バナジウム酸マグネシウムは約半世紀前に発見された物質ですが、科学計測技術や解析技術の向上によって、これまでずっと謎であった化学結合状態を明らかにすることができました。

今回の研究でバレンスボンドリキッドなど新たな状態の出現が示唆される結果が得られたことから、今後、放射光 X 線を用いて更なる詳細を調べるのが重要です。

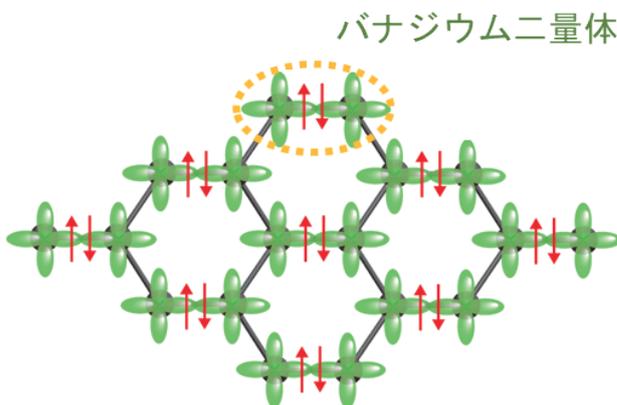


図2：はしご状に並んだバナジウム二量体状態の模式図。緑はバナジウムイオンの $3d$ 電子軌道、赤い矢印は電子スピンを示す。

4. 付記

本研究の一部は、科学研究費補助金「若手研究 19K15280」、旭硝子財団研究助成、徳山科学技術振興財団研究助成、東京工業大学科学技術創成研究院フロンティア材料研究所共同利用研究、高輝度光科学研究センター（課題番号：2021A1342、2021B1327）の支援を受けて行われました。

論文情報

タイトル：Cation Dimerization in $3d^1$ Honeycomb Lattice System

著者：Hajime Yamamoto, Sachiko Kamiyama, Ikuya Yamada and Hiroyuki Kimura

掲載誌：Journal of the American Chemical Society

DOI：10.1021/jacs.1c10977

用語説明

（注1）イルメナイト型構造

化学式 ABO_3 で示される化合物において見られる結晶構造の一種。鉱物であるイルメナイト $FeTiO_3$ に由来する。

（注2）二量体化

ここでは、二つの原子が化学結合（共有結合）により一つにまとまる現象を指す。

（注3）放射光 X 線回折実験

結晶構造を調べる手法。放射光 X 線を試料に照射し、回折強度を測ることで原子の並び方や原子間の距離を決定する。この実験を行った SPring-8 は、理化学研究所が所有する兵庫県の播磨科学公園都市にある世界最高性能の放射光を生み出す大型放射光施設であり、利用者支援などは JASRI が行っている。SPring-8 の名前は Super Photon ring-8 GeV に由来。

（注4）バレンスバンドリキッド

二量体（電子軌道）が液体のようにゆらいでいる状態。

（注5）超高压合成法

地球内部で鉱物ができるような、数～数十万気圧、1000°C以上の超高压・高温条件で物質を合成する手法。

（注6）BL02B2 ビームライン

高エネルギー放射光を利用した粉末回折用ビームライン。大型デバイセラーカメラを用いることで、精密構造解析に必要な統計精度の高い粉末回折データを測定することができる。

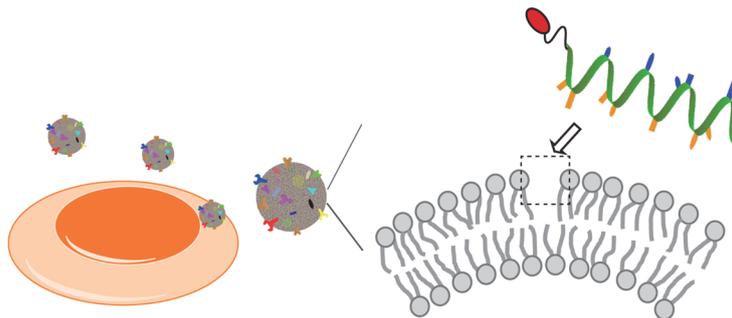
脂質膜の曲率に応答する蛍光プローブ

～細胞外小胞解析の新ツール～

2021年1月25日 化学専攻 准教授 佐藤 雄介

概要

エクソソームと呼ばれる直径 100 nm 程度の小さな小胞にある高い曲率性脂質膜を認識し、蛍光応答を示す新しいタイプの蛍光プローブ^(注1)を開発しました。このプローブは様々な種類のエクソソームに適用できる汎用性を示すことを実証しました。



細胞から放出されるエクソソームの高曲率性膜に応答する蛍光プローブの開発。プローブは脂質パッキング欠損（点線で囲った領域）に結合する。

研究内容

生体内では様々なサイズで多彩な生体分子を含む小胞が常に生成されており、これらは様々な生命現象や疾患などに関与しています。このうちエクソソームと呼ばれる直径 50-150nm の小胞は、ほぼ全ての細胞から放出されており、その表面や内部に含むタンパク質・核酸・代謝物などを運搬する役割を果たしています。エクソソームは細胞の種類や状態を反映した情報を持つため、新しいバイオマーカーとして期待されています。現在、エクソソームの解析には、タンパク質の解析で使用されている抗体法が用いられていますが、放出細胞により表面性質が大きく変化してしまうエクソソームを標的とした場合、この方法で検出できるものは抗体が認識する標的タンパク質（マーカー）が現れているものに限定されてしまいます。

私たちは、あらゆる種類のエクソソームに適用しうる新しい分析技術の開発を目的として、これまでの手法の弱点を克服した、エクソソーム全般に共通する表面の高曲率性膜を認識できる蛍光プローブを設計しました。一般に細胞膜のような直径が数 μm 程度の比較的大きな生体膜の場合、それは、脂質分子が整った（パッキングされた）二重膜構造を取りますが、直径が 100 nm 程度まで小さくなると、その高い膜曲率のため膜を構成する脂質二重膜の整列が乱れた構造が現れることが知られています（図 1）。私たちはこうした「脂質パッキング欠損」と呼ばれる構造に結合する蛍光プローブを開発することを目指して、この構造に対する結合モチーフである「両親媒性 α -ヘリックスペプチド(AH ペプチド)」を用いることにしました。AH ペプチドは α -ヘリックス構造^(注2)を取ると、疎水性アミノ酸と親水性アミノ酸が同一平面になるような特徴を持っており、このうち疎水性アミノ酸で構成される面が脂質パッキング欠損に結合することが可能です（図 2）。私たちは AH ペプチドとしてアポリポプロテイン A-I タンパク質^(注3)の C 末端領域にある 22 残基(ApoC)を選び、さらに ApoC が結合する反応を蛍光応答として出力するために、ペプチドの N 末端に環境応答性蛍光色素である Nile Red(NR)を連結したプローブ ApoC-NR を設計し、合成しました（図 2）。

エクソソームを模した合成リポソーム^(注4)を用いて ApoC-NR の機能を評価したところ、リポソームの曲率が高くなるにつれて蛍光強度が増加することが分かりました(図3)。NR だけからなる分子の場合、こういった曲率依存性は見られないことから、これは高曲率性膜で多く現れる脂質パッキング欠損を ApoC 部位が認識していることが分かります。これまでも高曲率膜選択的なペプチドプローブは数例報告されていますが、これらは主に静電相互作用による結合反応を用いたものであるため、曲率選択性はほとんど現れていませんでした。このことから、結合部位として AH ペプチドを用いて脂質パッキング欠損を狙うことが、高曲率膜選択性に重要であることが分かります。ApoC-NR は実サンプルである K562 細胞(白血病細胞株)由来エクソソーム添加に伴い明瞭な発蛍光応答を示し、 10^5 個/ μ L 程度のエクソソーム検出が可能であり、これまでの抗体法(ELISA^(注5))と同程度の検出感度を示すことが分かりました。一方、検出までに少なくとも3時間以上必要な ELISA と比べて、私たちの蛍光プローブを用いた手法では5分以内に測定可能です。さらに、複数の細胞由来エクソソームを用いた検討から、ApoC-NR はエクソソームの種類、つまり表面のタンパク質発現量が大きく異なる種類に対しても同程度の検出が可能であることが分かりました。これはタンパク質発現量に依存する抗体法とは明確に異なる点で、本手法が高い汎用性を持つ分析技術であることが実証できました。これにより、異なる細胞種類や細胞状態から放出されるエクソソームを正しく迅速に解析できる新たな技術として有用であると期待できます。現在、プローブ機能の改良や体液中に含まれるエクソソーム解析に基づく疾患診断法としての利用について更なる研究を進めています。

発表雑誌

この研究は JST さきがけならびに科学研究費補助金のサポートを受け、東北大学の佐藤雄介准教授らの研究グループにより行われました。研究成果はイギリス王立化学会の学術雑誌である「*RSC Advances*」10 巻に掲載されました。

参考図

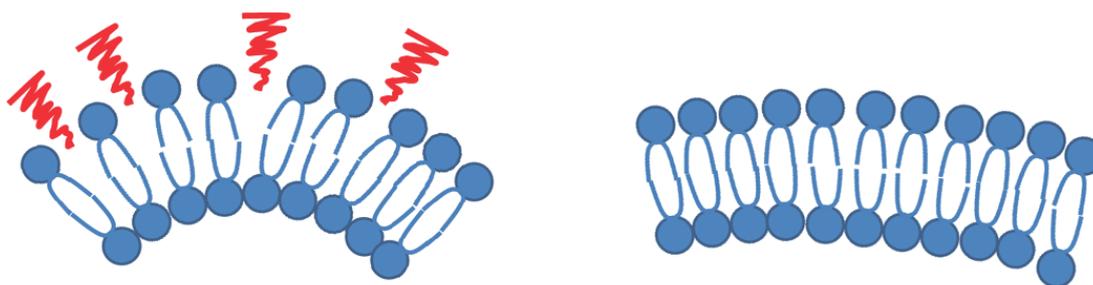


図1. 曲率の高い膜(左)は曲率の小さい膜(右)と比べて脂質パッキング欠損(赤)が多く現れる。

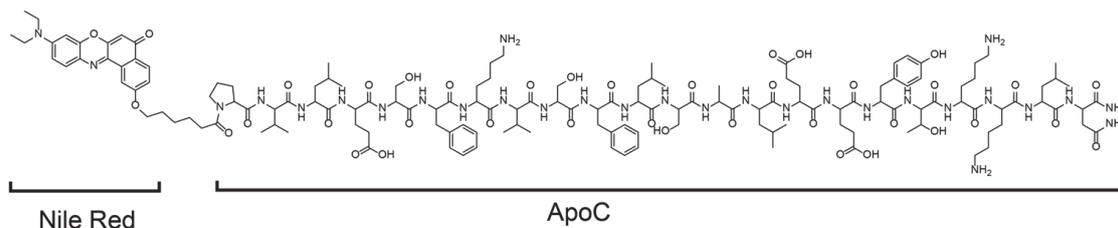


図2. ApoC-NR の構造。ApoC ペプチド(配列: PVLES FKVSF LSALE EYTKK LN, 左→右が N 末端→C 末端を示す)に NR を連結することで合成した。

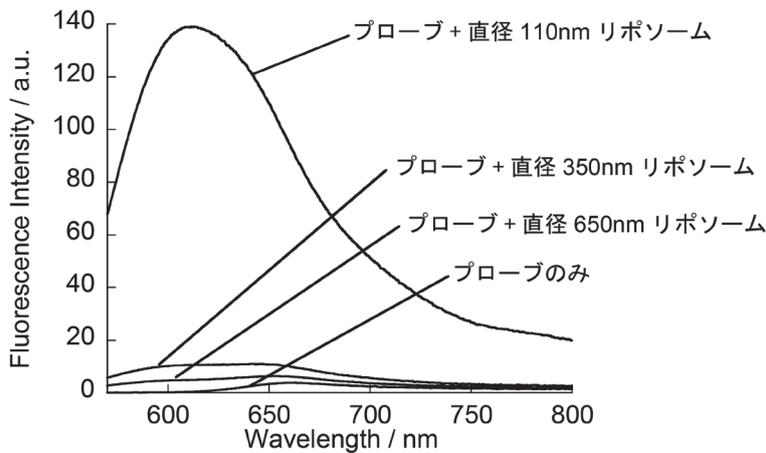


図3. ApoC-NRの合成リポソームに対する蛍光応答。直径の小さい高曲率性膜を持つリポソームに対して選択的にプローブの蛍光強度が増加する。

用語説明

(注1) 蛍光プローブ

標的の分子や特定の構造に結合したり、反応したりすること自身の蛍光強度や蛍光波長が変化する分子のことで、標的の検出や性質変化を評価するのに有用なツールです。

(注2) α -ヘリックス構造

タンパク質の取る二次構造の一つ。1回転の長さが5.4Åで、3.6個のアミノ酸残基に相当するらせん構造です。

(注3) アポリポプロテイン A-I タンパク質

高密度リポタンパク質 (HDL) の主要な構成タンパク質で、コレステロール代謝に重要な役割を果たしている。このうち、C末端にある領域は様々な生体膜と結合する機能がある。

(注4) 合成リポソーム

脂質二重膜を持つ球状の小胞。押し出し法や超音波処理などにより、直径がある程度揃った小胞を調製することができる。

(注5) ELISA

酵素結合免疫吸着検査法 Enzyme linked immunosolvent assay の略。エクソソーム解析では、エクソソームの表面にあるタンパク質を認識する抗体が固定化された基板上でエクソソームを捕捉した後に、別途酵素などを標識した抗体を用いて検出する手法。基板で捕捉されない分子や過剰の標識化抗体を洗浄する必要がある。

大阪北部地震前の大気中ラドン濃度の減少を検出

～本震前の地震活動静穏化が原因～

2021年4月1日 地学専攻 准教授 武藤 潤

発表のポイント

- 2018年大阪北部地震の前に大気中ラドン^(注1)濃度が大きく減少
- 本震前後に震源域西側での地震活動静穏化が原因か
- 岩盤に生じる亀裂(割れ目)が大気中のラドン濃度変化に深く関与することを示唆
- 内陸地震前に大気中のラドン濃度が低下することを世界で初めて報告

概要

地震の前には様々な異常が起こることが報告されています。地震前に地殻に存在する放射性元素であるラドン(²²²Rn)の濃度が増加することもその1つです。これまで、大地震の本震前の前震活動やゆっくりすべり^(注2)などで、大気中のラドン濃度が増加することが知られていました。

東北大学大学院理学研究科の長濱裕幸教授、武藤潤准教授らの研究グループは、大阪医科大学、神戸薬科大学と共同で、2018年6月18日の大阪北部地震発生前後に大阪医科大学で観測された大気中ラドン濃度データを詳細に解析しました。その結果、2014年から観測されていた大気中ラドン濃度は、地震の約1年前から減少し、本震後2020年6月まで低いことがわかりました。一方、観測点周辺での地震活動は地震前に比べて減少していました。さらに、本震後の地震活動も、余震域を除く近畿地方全域で低下しており、これが地震後にラドン濃度が増加しなかった原因と考えられます。本研究は、大地震前の静穏化^(注3)に伴って、大気中のラドン濃度が低下することを世界に先駆けて明らかにしました。大気中のラドン濃度を用いて、大地震に伴う様々な地殻変動を明らかにできる可能性が得られました。

本研究成果は、2021年4月2日付で「*Scientific Reports*」にオンライン掲載されました。

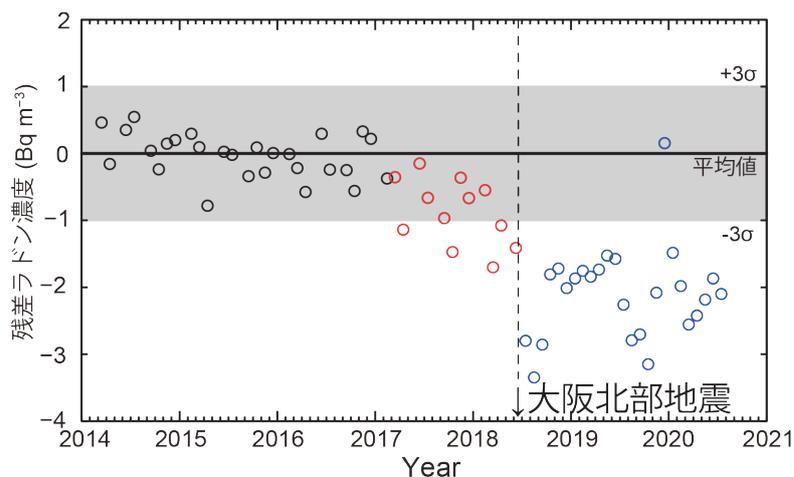


図1. 2018年大阪北部地震前後で観測された大気中ラドン濃度変動。黒丸は地震前の通常時変動、赤丸が地震前、青丸は地震後の変動を示す。灰色の領域は通常時の変動から計算される 3σ の変動範囲を示す。

詳細な説明

地震の発生の前後において、地中に含まれる放射性元素の1つであるラドン(²²²Rn)の濃度が異常に変化したという報告がなされています。このような現象は、古くから世界中で報告されてお

り、地震の予測を目指した研究が進められています。しかし、大地震の前にどのような原因でラドン濃度に異常が生じるのかいまだによくわかっていません。

東北大学大学院理学研究科地学専攻断層・地殻力学グループ 長濱裕幸教授、武藤潤准教授、平野光浩（博士課程前期2年、東北大学変動地球共生学卓越大学院プログラム）は、大阪医科薬科大学、神戸薬科大学とともに大気中に含まれるラドンに着目し、ラドン濃度の変化と地震発生との関連性について研究をおこなっています。大気中に存在するラドンは、地中に存在するラドンが散逸したものであり、地震によって岩石や地盤に細かい亀裂（割れ目）ができることによって促進されます。これまでの我々のグループでは、1995年兵庫県南部地震や2011年東北地方太平洋沖地震の前に、大気中のラドン濃度が異常に変化していたことを明らかにしてきました。

(<https://www.sci.tohoku.ac.jp/news/20210219-11450.html>)

今回の研究では、2018年大阪北部地震（マグニチュード6.1）の前後で、震源地に近い大阪医科薬科大学で観察された大気中ラドン濃度のデータを詳細に解析しました。2014年から2018年6月18日の本震を含み、2020年までの7年間にわたる大気中のラドン濃度の計測から、本震の約1年前の2017年末頃からラドン濃度は下がり始めたことが明らかになりました（図1）。このラドン濃度の下がった時期は、大阪医科薬科大学周辺の震源地西側（図2の領域1）での地震活動が静穏化した時期に相当します。

我々のグループはこれまでに、1995年兵庫県南部地震、2011年の東北地方太平洋沖地震や和歌山県北部地震の前後の大気中ラドン濃度変動に関して報告してきました。これらの地震では、本震前に、岩盤に微細な亀裂（割れ目）が発生することで、ラドン濃度が増加し、本震後には地震の割れ目が徐々に癒えて閉じることでラドン濃度が減少していく可能性が明らかになりました。大阪北部地震の震源域の東側（図2の領域2）では活発な余震活動が見られたものの、地震後3年間においても大気中ラドン濃度は低いままでした。このことは、大阪北部地震の前に現れた地震活動の静穏化によって、地盤や岩石が変形しなかったため、ラドン濃度が増加しなかったことを意味しています。

今回の研究は、大地震前にラドン濃度が増加するというこれまでの研究とは異なるものですが、岩盤に生じる亀裂（割れ目）が大気中のラドン濃度変化に深く関与することを示唆するものです（図3）。大阪医科薬科大学周辺では、大阪北部地震後も、地震活動は低く、ラドン濃度も低いままなので、今後も地殻変動を注視する必要があります。断層・地殻力学グループでは、「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画」の支援を受けて全国の研究機関とともに大気中ラドンモニタリングのネットワークの構築を進めています。

論文情報

雑誌名： *Scientific Reports*

論文タイトル： Preseismic atmospheric radon anomaly associated with 2018 Northern Osaka earthquake

筆者： Jun Muto^{1,*}, Yumi Yasuoka², Nao Miura², Daichi Iwata¹, Hiroyuki Nagahama¹, Mitsuhiro Hirano¹, Yoshiro Ohmomo³, Takahiro Mukai^{2,4}

* 責任者

¹ 東北大学大学院理学研究科 地学専攻 ² 神戸薬科大学 放射線管理室

³ 大阪医科薬科大学 薬学部 薬学教育研究センター ⁴ 神戸薬科大学 薬品物理化学研究室

DOI 番号： doi: 10.1038/s41598-021-86777-z

URL： <https://www.nature.com/articles/s41598-021-86777-z>

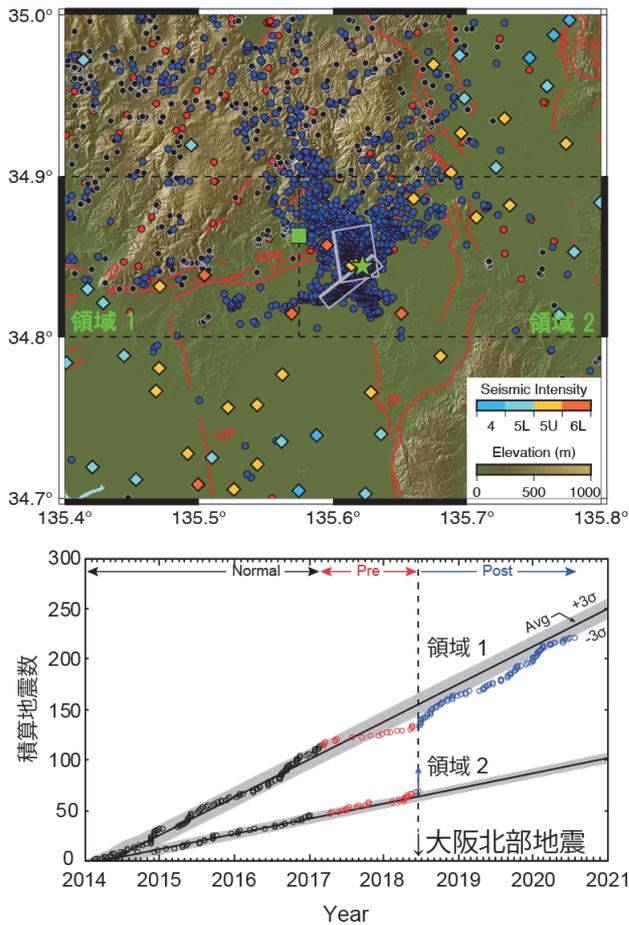
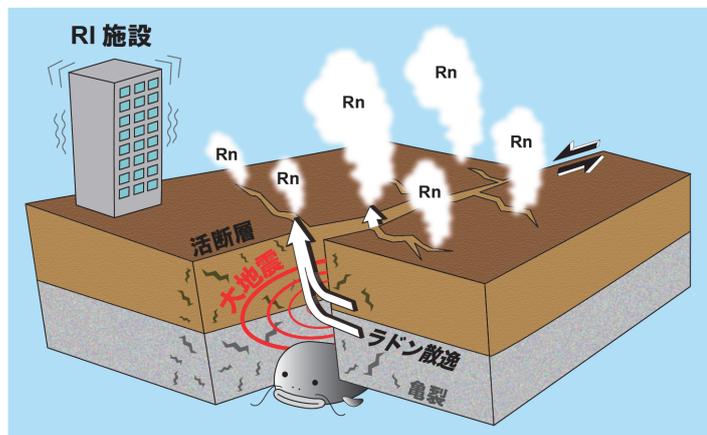


図2. 2018年大阪北部地震前後の震源域周辺の地震活動(上)とその時系列変動(下)。(上)緑色の四角が大気中ラドン濃度の観測点(大阪医科薬科大学)、星が震源を示す。黒丸は通常時の地震活動、赤丸が本震前の地震活動、青丸は余震を示す。ダイヤモンドは本震の震度を示し、灰色は地震観測から推定された断層を示す。(下)観測点周辺の地震活動。灰色は通常時の地震活動から得られた地震数の3シグマ領域を示す。

図3. 地下からのラドンガス散逸を示すイメージ図。大気中のラドン濃度は、地震前後に発生する岩盤の亀裂(割れ目)を通過して、ラドン(^{222}Rn)を含むガスが地上に散逸し、放射線管理(RI)施設で計測される。



用語説明

(注1) ラドン

自然界に存在する気体。土壌や大気、水中など、いたるところに存在する。土壌中で生成されたラドンは、一部は土壌の間隙や割れ目を通過して大気へ移行し、一部は地下水へ取り込まれる。

(注2) ゆっくりすべり

地下にある断層が地震波を放出せずによりゆっくりと動く現象。スロースリップとも呼ぶ。

(注3) 地震の静穏化

巨大地震の直前にそれまでの地震発生率が低下する現象。

模擬実験で隕石アミノ酸の同位体組成を再現

－小惑星有機物の主要生成反応のひとつが明らかに－

2021年4月27日 地学専攻 准教授 古川 善博

発表のポイント

- 隕石中のアミノ酸の炭素同位体組成の特徴が、糖を化学的に合成する反応として知られるホルモース型反応^(注)によって再現できることを発見した。
- ホルモース型反応が、小惑星有機物の主要な生成反応の一つであった。
- 小惑星に含まれるアミノ酸や糖などの低分子有機物は、極低温環境に特異的に存在する材料ではなく、これまで考えられていたよりもはるかに広範囲に分布していた一般的な材料から生成されていた。

概要

隕石に含まれるアミノ酸や糖、核酸塩基などの低分子有機物は、その特異的な炭素同位体組成（ ^{13}C の濃縮）から、太陽系外縁部や太陽集積前の極低温環境でできた分子から作られたと考えられてきました。

東北大学大学院理学研究科の古川善博准教授、岩佐義成さん(当時博士課程前期2年)、北海道大学低温科学研究所の力石嘉人教授の研究グループは、隕石に含まれる主要な有機物である不溶性有機物とアミノ酸や糖などの低分子有機物との間に存在する大きな炭素同位体組成の差が、



隕石有機物の生成反応の一つとして提案されてきたホルモース型反応によって再現できることを明らかにしました。

本研究の成果によって、小惑星に含まれるアミノ酸や糖などの低分子有機物は、これまで考えられていたよりもはるかに広範囲に分布した一般的な材料から生成されていたことが示されました。

本研究成果は、2021年4月29日に米国科学振興協会（AAAS）が発行する『*Science Advances*』で公開されました。

図1. アミノ酸, 糖, 不溶性有機物を含むマーチソン隕石 ©Yoshihiro Furukawa

発表内容

隕石は小惑星から飛来した物質で、一部の隕石は約46億年前に生成したアミノ酸や糖などの生命の材料となる有機物を含んでいます。そのため、隕石に含まれる有機物が生命誕生前の地球に飛来して、生命の材料となった可能性が指摘され、JAXAの探査機はやぶさ2やNASAの探査機OSIRIS-Rexによって精力的に探査が行われています(図2)。しかし、隕石に含まれる有機物が、どのような材料からどのような反応で生成したのかは、多くの可能性があってこれまで明らかになっていませんでした。



図2. はやぶさ2が試料を回収した小惑星Ryugu ©JAXA/東大/他

東北大学大学院理学研究科の古川善博准教授、岩佐義成さん(当時博士課程前期2年)、北海道大学低温科学研究所の力石嘉人教授の研究グループは、炭素質隕石に含まれるアミノ酸や糖などの低分子有機物が炭素の¹³C同位体を多く含み、逆に隕石中の主要な有機物である不溶性有機物が炭素の¹²C同位体を多く含む特徴を持つことに着目し、この同位体組成の特徴が糖を化学的に合成する反応として知られるホルモース型反応に伴う炭素同位体の挙動で説明できるという仮説を立て、それを検証するための模擬実験を行いました。生成したアミノ酸と不溶性有機物の炭素同位体組成の分析を行った結果、アミノ酸は炭素の¹³C同位体を多く含み、不溶性有機物は炭素の¹²C同位体を多く含み、その差は隕石有機物の特徴に合致することが明らかになりました(図3)。さらに、生成したカルボン酸とアミンの相対濃度が隕石中のカルボン酸とアミンの総体濃度と合致することも明らかになりました。

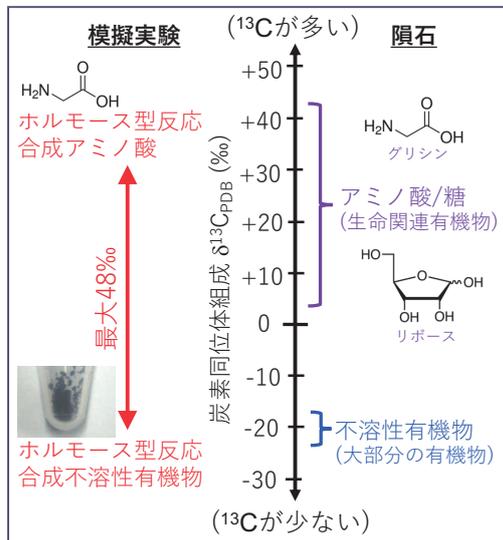


図3. 隕石有機物とホルモース型反応合成有機物の炭素同位体組成

これまで、隕石アミノ酸の炭素同位体組成の特徴はアミノ酸を作った材料分子が10 K(-263°C)以下の極低温環境で生成することによるものと考えられてきました。しかし、実際にそのような環境で隕石有機物の炭素同位体組成に相当する特徴を持つアミノ酸や不溶性有機物が生成する実験結果は得られていません。本研究の成果は、隕石アミノ酸と不溶性有機物の炭素同位体組成の特徴が極低温環境で生成する材料に限らず、はるかに広範囲に分布する炭素同位体組成に差のない材料から作り出されていたことを示すものです。また、先行研究によってホルモース型反応の生成物組成が隕石中に含まれる不溶性有機物、アミノ酸、糖、含窒素ヘテロ環化合物などの様々な有機物組成と類似することが明らかになっており、本研究でさらにカルボン酸とアミンの含有量の類似性、主要な有機物である不溶性有機物とアミノ酸の炭素同位体組成の一致を明らかにしたことは、ホルモース型反応が小惑星有機物を生成した主要な反応の一つであったことを示しています。

ホルモース型反応は、小惑星内部の水熱反応だけでなく、小惑星集積以前の微粒子表面での光化学反応でも起こった可能性があり、低温環境でも炭素同位体組成に差のない材料から¹³C同位体を多く含むアミノ酸や糖などの低分子有機物が生成した可能性があります。将来的に計画されつつある彗星からのサンプルリターンが実現すれば、その生成環境の特定が期待されます。以上の成果は、今週、米国科学振興協会(AAAS)が発行する『Science Advances』に出版されました。

謝辞

本研究は日本学術振興会科研費補助金(18H03728, 19K21888, 20H00185)と北海道大学低温科学研究所共同研究(20G049)の支援を受けて行いました。

語句説明

(注) ホルモース型反応

アルカリ溶液中でホルムアルデヒドから多種類の糖を合成する反応として 1860 年代に発見されたホルモース反応を主体とする反応。近年、隕石有機物の生成反応の一つとして、提案された反応。

論文情報

雑誌名：*Science Advances*

論文タイトル：Synthesis of ^{13}C -enriched amino acids with ^{13}C -depleted insoluble organic matter in a formose-type reaction in the early solar system

著者：Yoshihiro Furukawa, Yoshinari Iwasa, and Yoshito Chikaraishi

DOI 番号：10.1126/sciadv.abd3575

「はやぶさ2」初期分析チーム 2021年6月より試料の分析開始

2021年5月13日 地学専攻 教授 中村 智樹

発表のポイント

- 「はやぶさ2」初期分析チームは2021年6月より、地球帰還カプセル内部の粒子分析を開始する（一年間）。
- 初期分析チームには14カ国、109の大学と研究機関、269名が参加予定である。
- 初期分析チームは研究対象や手法の異なる6つのチームで構成される。

概要

小惑星探査機「はやぶさ2」^(注1)は2020年12月に小惑星リュウグウ^(注2)から帰還し、サンプルリターンに成功した。サンプルコンテナの内部の粒子は、本年6月以降、「はやぶさ2」プロジェクト初期分析チームが一年間、分析を行い、プロジェクトの科学目標である太陽系の起源と進化、地球の海や生命の原材料物質に関する成果をあげることをめざす。

初期分析チームは、化学分析、石の物質分析、砂の物質分析、揮発性成分分析、固体有機物分析、可溶性有機物分析の6つのチームから構成され、14カ国、109の大学と研究機関、269名が参加予定である。



「はやぶさ2」サンプルキャッチャ内の粒子（©JAXA）。第一回目のタッチダウン時に採取されたものと考えられる。キャッチャ円筒の直径は48mm。

内容

「はやぶさ2」が持ち帰った粒子は宇宙科学研究所キュレーション施設での初期記載の後、2021年6月ごろより、プロジェクト内の初期分析チームで詳細分析される。一年間の分析で、プロジェクトの科学目標である太陽系の起源と進化、地球の海や生命の原材料物質に関する成果をあげることがめざす。

初期分析は、日本を中心に14カ国、109の大学と研究機関、269名が参加する国際チームで進めていく。初期分析チームは6つのサブチームに分かれ、詳細は以下の通りである。全体の統括は東京大学の橘 省吾 教授が担当する。

1.化学分析チーム チームリーダー：北海道大学 冨本 尚義 教授

研究内容：「はやぶさ2」が持ち帰った小惑星リュウグウ試料の化学的特徴を明らかにする。そのため平均的な化学組成と元素の同位体組成を分析する。また、試料構成要素の同位体組成変動と形成年代を求める。これらの結果から、リュウグウと地球に降り注ぐ隕石の種類との関係を明らかにし、リュウグウの起源と成因を探る。



[化学分析チーム] 元素分布・同位体分布を観察する同位体顕微鏡（北海道大学）



2.石の物質分析チーム

チームリーダー：東北大学 中村 智樹 教授

研究内容：粗粒な粒子（およそ1mm以上）の物質分析を行う。水を含む鉱物である「含水鉱物」に着目する。粒子の光の反射スペクトルを取得し、小惑星リュウグウ表面の物質分布を推定する。放射光高エネルギービームを使った非破壊の物質分析を行い、回収試料の3次元の内部構造や元素分布を求める。高分解能電子顕微鏡を用いた微細組織観察を行う。熱伝導率などの物性測定も行う。すべてのデータを統合し、リュウグウの形成過程をモデル化する。

[石の物質分析チーム] 非破壊の物質分析をおこなう放射光施設 Spring-8、高エネルギー加速器研究機構。米国、フランス、ドイツの放射光施設も利用する。

3.砂の物質分析チーム チームリーダー：京都大学/九州大学 野口 高明 教授

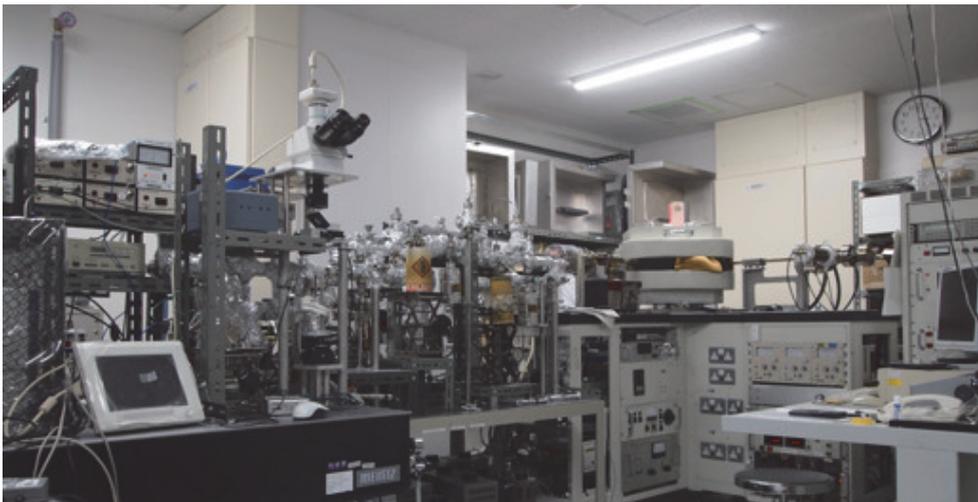
研究内容：大気のない天体の表面は、じかに宇宙空間にさらされている。太陽からは太陽風というプラズマの流れが常に吹き出しており、小惑星リュウグウの表面はそれをずっと浴び続けている。また、とても小さな隕石がライフル銃よりもずっと早い速度で衝突している。砂の物質分析チームでは、そのような厳しい環境にさらされてリュウグウを作っている物質の表面がどのように変化しているかに特に注目して研究を行う。

[砂の物質分析チーム] 小惑星試料を観察・分析・加工するプラズマ集束イオンビーム試料加工観察装置（九州大学）。



4.揮発性成分分析チーム チームリーダー：九州大学 岡崎 隆司 准教授

研究内容：「はやぶさ2」サンプルコンテナに封入された揮発性物質と小惑星リュウグウ固体試料中の揮発性物質の元素組成と同位体組成を分析する。水素、窒素、酸素、希ガスなどさまざまな揮発性物質を分析して、リュウグウの材料物質の起源や地質学的年代情報を得ることを目標としている。リュウグウ固体試料は大気非暴露での分析を国内外の研究所でを行い、リュウグウの「生」の情報を得ることをめざす。これに加えて、京都大学複合原子力科学研究所で中性子照射を行うことでイリジウムなどの微量元素分析と Ar-Ar(アルゴン-アルゴン)年代など、さまざまな物質科学情報を貴重な試料から同時に取得する計画である。

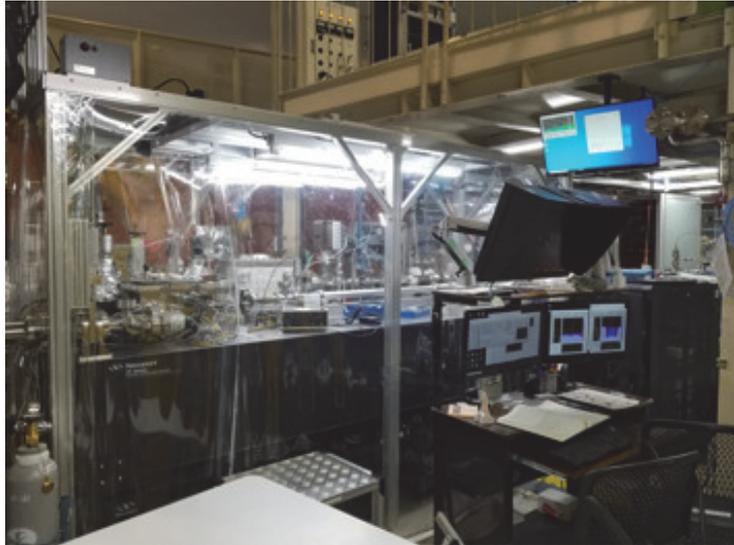


[揮発性成分分析チーム] コンテナから採取されたガスや固体粒子中のガスに含まれる希ガスを分析する質量分析装置（九州大学）。

5. 固体有機物分析チーム チームリーダー：広島大学 藪田 ひかる 教授

研究内容：初期太陽系における有機物の起源と進化を解明するために、さまざまな顕微分光法（赤外、ラマン、放射光軟X線）、電子顕微鏡、同位体顕微鏡を複合して小惑星リュウグウ試料中の固体有機物の分子・同位体組成と形態およびそれらの分布を明らかにする。未加工の試料からは固体有機物の化学組成の不均一性を明らかにし、有機物形成の多様性の理解をめざす。酸処理により分離・精製される不溶性有機物の分析からは固体有機物の平均組成を明らかにし、リュウグウがどのような天体であるかを特徴づける。

[固体有機物分析チーム] 高エネルギー加速器研究機構に設置された軟X線顕微鏡。固体有機物の構造や分布を明らかにする。



6. 可溶性有機物分析チーム チームリーダー：九州大学 奈良岡 浩 教授

研究内容：小惑星リュウグウにどのような可溶性有機化合物が含まれているかを明らかにする。試料を種々の溶媒を用いて抽出し、主にクロマトグラフィー質量分析によって有機分子を同定・定量する。主な対象化合物はアミノ酸や含窒素環状化合物などであるが、検出可能な分子を超高分解能質量分析によって網羅的に解析する。また可溶性有機化合物の空間分布や炭素・窒素・イオウなどの存在量・同位体比分析も行う。これらの分析は日本・アメリカ・ドイツ・フランスの国際共同研究チームで実施する。



[可溶性有機物分析チーム] 九州大学地球外有機物専用クリーンルームでの分析リハーサル。

用語解説

(注1) 小惑星探査機「はやぶさ2」

日本の小惑星サンプルリターン探査機。2014年12月に打ち上げ、2018年6月に小惑星リュウグウに到着し、約17ヶ月の近傍観測期間中に小惑星表面に2回の着地に成功した。着地の際に弾丸を発射し、舞い上がった粒子が今回、持ち帰られたと考えられる。2020年12月6日に豪州に地球帰還カプセルを着地させ、現在は拡張ミッションとして、小惑星1998 KY26に向けて、飛行中である。

(注2) 小惑星リュウグウ

そろばん玉のような形状をしたC型小惑星。「はやぶさ2」による探査の結果、元天体が破壊され、その破片が再度集まったような天体であることや表面には含水鉱物（構造中に水を含む鉱物）が存在することが明らかとなった。反射スペクトルの類似性から、始原隕石である炭素質コンドライトとの類似性が指摘されており、帰還試料分析によってその詳細が解明される。

海にすむ生物の複雑な関係性を捉える

緩い種間関係と種の多様性が生態系を安定化

2018年4月5日 生物学科、生命科学研究所 教授 近藤 倫生

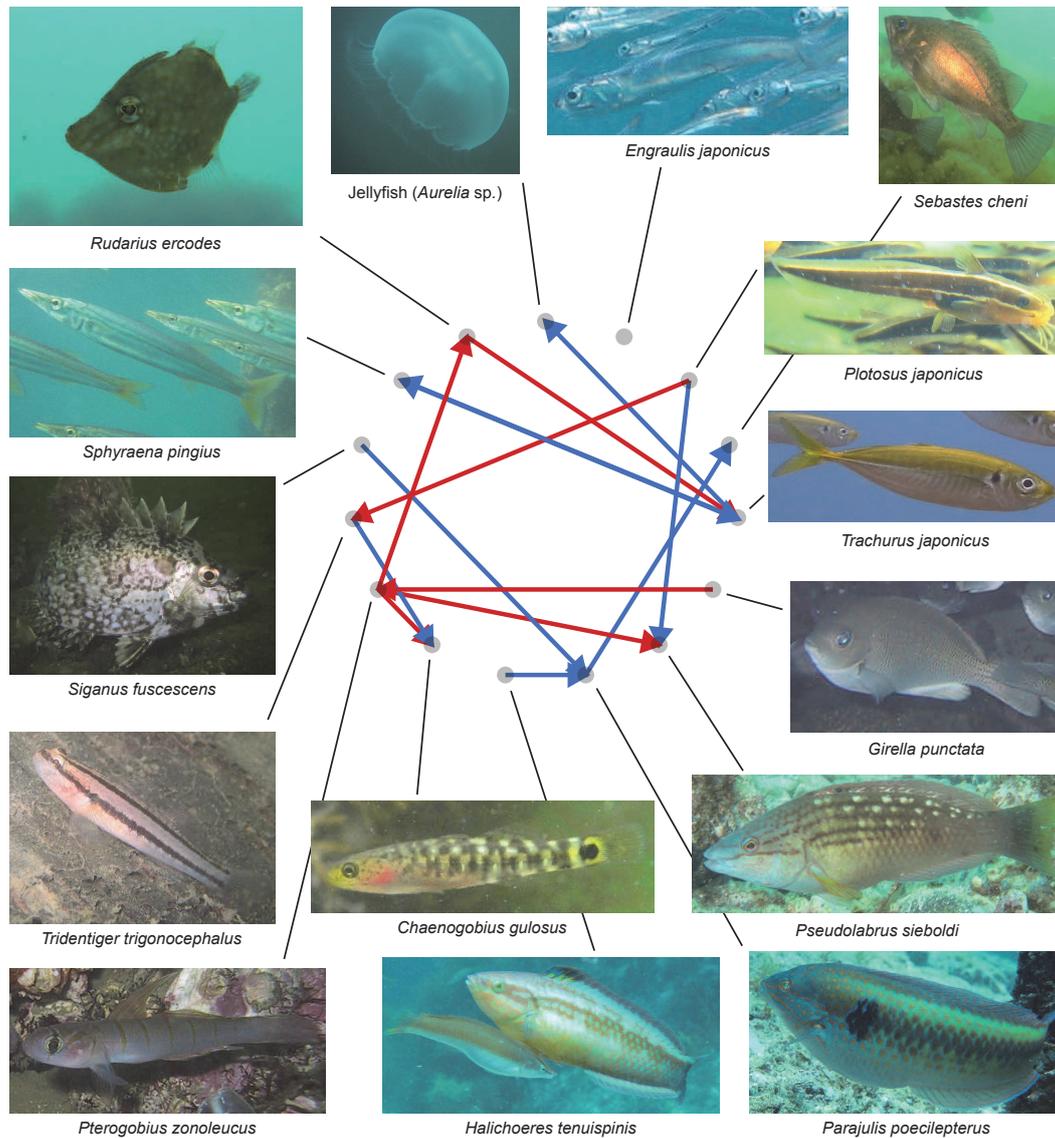


図1. 本研究の対象となった舞鶴湾の15種の生物と、個体数変動データから明らかになった生物種間の14の関係性(種間相互作用)。矢印は影響を与える種から、影響を受ける種に向かって引かれている。色は影響の符号(正負)で、青色(正)は平均的には相手を増やす作用、赤色(負)は平均的には相手を減らす作用を表している。Nature より。

概要

理学部生物学科/生命科学研究所生態発生適応科学専攻の近藤倫生教授、京都大学/科学技術振興機構の潮雅之研究員、京都大学の益田玲爾准教授らの国際研究グループ(日本・台湾・アメリカ)は舞鶴湾での過去12年間におよぶ魚類とクラゲを含む15種の生物の個体数変動デー

タを解析することで、種間の関係性が時間によって変動する様子を詳細に捉えることに成功しました。また、これに基づいて、種間の関係性と種多様性が生態系安定化の鍵であることを突き止めました。

野外の生態系における生物種間には、ある生物種の個体数が増減すると他の生物の個体数もその影響を受けて増減する、種間相互作用と呼ばれる力が働いていると考えられています。また、多様な生物種が相互作用する生物群集^(注1)にはその動態を安定化させる仕組み^(注2)が備わっており、環境が多少変化しても想定外の大変動や破綻が生じにくくなっているのではないかと考えられてきました。しかし、野外において種間相互作用(=種間に働く力)を観察したり、個体数変動の安定性を測ったりすることはいずれも困難なため、多種の間に働く非常に多くの種間相互作用を詳細に描き出し、それが生物群集の安定性におよぼす影響を野外で検証した研究は過去に例がありませんでした。

本研究では、京都府の舞鶴湾で12年間に渡って続けられた潜水調査データ^(注3)を、新しく開発した数理的手法^(注4)で分析しました。その結果、①湾内に生息する主要な15種の生物(14種の魚とクラゲ)の間に働く相互作用を捉えることに成功しました。さらに、②舞鶴湾の魚類群集は夏季に安定になり、冬季に不安定になるという季節変動を示すこと、③舞鶴湾の魚類群集は、魚種の種類が多くなり、種間相互作用が弱められることで安定になることを突き止めました。

本研究で開発した数理手法の利用により、他の生態系でも生物種間に働く相互作用を検出することが可能です。また、過去の観測データが種間相互作用や群集安定性を検出する鍵となったことから、生態系の維持や反応を理解する上で、長期生態系観測が非常に有効であることが示されました。

研究内容

1. 背景

生態系には様々な種類の生物が共に生活していますが、いかなる生物の個体数(人口)も時と共に変動します(個体数変動)。自然界における個体数は変動してもだいたい一定の範囲に収まる安定性を有していて、個体数がゼロになってしまうような「絶滅」現象や、特定の生物種の個体数のみが急激に増加する「大発生」現象は、頻繁には生じません。また、生物の個体数は無秩序に増減することは滅多になく、いつ頃増えて、いつ頃減少するといった「変動の規則性」が見られるのが普通です。このような個体変動に見られる「安定性」がもたらされる仕組みの解明は、生態学における重要な課題です。

生物の個体数は他種からの影響(種間相互作用)を受けて変動することが知られています。種間相互作用は、捕食-被食関係、助け合う関係、競争関係などの様々な生物間の関わりに由来すると考えられます。個体数変動の仕組みやその安定性を理解する上で、種間相互作用を把握することは必須です。しかし、種間相互作用は、ちょうど地球が私たちを引っ張る重力が目には見えないのと同様に、直接に観察することはできません。したがって、その強さや種類を知るには、大規模な野外実験などを行って推定するしかありませんでした。さらに、種間相互作用自体も変動するので、自然の中に共存する多様な生物の間に働く種間相互作用を正しく検出することは、非常に困難であると考えられています。

生態系に共存する生物種が多様だと、生物の個体数変動が安定化するという仮説があります。安定化のメカニズムには、種間相互作用が何らかの役割を果たしていると考えられていますが、役割の中身はよく分かっていませんでした。その理由として、第1に、自然生態系には多くの種類の生物種が存在し、それらの間の種間相互作用を正しく同時に評価することが困難である

こと、第2に、野外における個体数変動の安定性を評価することが困難であること、第3に、種多様性・種間相互作用・個体数変動の安定性の間の因果関係を明らかにすることが困難だったことがあります。

2. 研究の位置付け

本研究では、舞鶴湾の14種の魚と1種のクラゲに注目しました。マアジ、シロメバル、アミメハギ、カタクチイワシ、ゴンズイ、メジナ、ホシササノハベラ、キュウセン、ドロメ、ホンベラ、チャガラ、アカオビシマハゼ、アイゴ、アカカマス、ミズクラゲです。これら15種の生物を2週間に一度の頻度で観測した過去12年分の個体数変動データを、新しく開発した数理的手法で解析することで、直接に目で見えて観察することはできない生物種間相互作用の検出に成功しました。データ解析をさらに進めることで、生物群集の安定性が大きく変動していることや、群集安定性が高くなる時、種の豊富さと種間相互作用の緩やかさが重要な役割を果たしていることが分かりました。以下に詳細を説明します。

15種の生物の間から、様々な強さや符号（正負）の計14の種間相互作用が検出されました。従来は、種間相互作用の強さや符号（正負）は時間とともに大きく変動しないと仮定されてきましたが、本研究から見えてきたのは全く異なる様相でした。多くの種間相互作用は、その強さが時間とともに大きく変動し、ときにはその符号（正負）までもが時間によって逆転するケースも見られました。

また、得られた種間相互作用を基に「局所リアプノフ安定性」と呼ばれる生物群集の安定性評価のための指標を計算することができます。局所リアプノフ安定性とは、生態系の状態（種組成）が本来の変化から少し外れてしまったときに、元の軌道に戻るかどうかを表す指標です。舞鶴湾の生物群集を解析した結果、種間相互作用の季節変化が、群集の安定性に影響をおよぼしていることが分かりました。夏になると舞鶴湾に生息する生物の種数が増えます。すると、種間相互作用の力が複数の生物種に分散されて弱まる希釈作用が働いて、個々の種間相互作用は冬に比べて緩やかになります。その結果、群集の安定性は夏に高く、冬になると低くなるという季節周期を示すのです。これまで生態学の仮説によって予想されていたように、複雑な動物群集において、種多様性が高まった結果として、群集の安定性が高まる証拠を示すことに初めて成功しました。また、これまで種の多様性が群集安定性を高める際に種間相互作用が果たす役割はほとんど分かっていませんでしたが、本研究によって、種間相互作用が緩やかになることが安定化を高める役割を果たしていることが発見されました。

3. 本研究の意義と今後の展開

本研究には大きく分けて3つの意義と今後に向けての展開が考えられます。

1つ目は、野外における生物種間の複雑な相互作用（種間相互作用）をその時間変化も含めて「ありのまま」捉えることに成功したことです。野外における種間相互作用の検出には、これまでは大掛かりな操作実験を行うなど、多大な労力を必要としてきました。したがって、多くの生物種の間での相互作用を同時に評価することは難しく、また、相互作用の時間変化を調べることは実質的に不可能でした。しかし本研究では、個体数変動のデータのみから多種間の相互作用を検出する数理的手法の利用により、複数の生物種間の相互作用を検出するだけでなく、その時間変動を示すことにも成功しました。種間相互作用は生物の個体数変動を理解する重要な要素です。本手法を他の様々な生態系に対しても広く用い、その結果を比較することで、野外における種間相互作用やその変動に関するより一般的なルールを見つけることができるかもしれません。

2つ目は、生物群集の安定性を評価し、さらに安定性の季節変動を明らかにしたことです。これまで、種多様性や種間相互作用によって群集の安定性が影響を受けることは推測されてきましたが、実際に野外の生態系で種多様性や種間相互作用の変動が、生物群集の安定性におよぼす影響を検証した研究はほとんどありませんでした。生物群集の安定性が変動するという事は、言い換えれば、生態系には外からの攪乱の影響を受けやすいタイミングと受けにくいタイミングがあるということです。同じ攪乱でも、安定性の高い時期であれば生物群集に大きな影響を与えませんが、安定性の低い時期では大きな影響を与えてしまうのです。このタイミングを正しく捉えることができれば、より効果的に生態系を保全したり生物資源を利用したりすることが可能になります。また、種多様性が生態系を安定化しているという発見から、生態系を安定に保つためには種多様性を保全しなくてはならないという示唆が得られます。

3つ目は、今回の研究は生態系や生物群集の長期にわたる観測が、生態系の変化や駆動原理を明らかにする上で、非常に有用な情報をもたらすことを示しています。今回利用した数理的手法は、時間変動データから多くの情報を取り出すことが可能です。実際、この研究では2週間に一度・12年間の長期・精細な個体数変動データを利用することで、種間相互作用や生物群集安定性、さらには生態系に安定性をもたらす要因の特定することができました。現在、これまでにない速度で生物が絶滅し、生態系の機能不全が進行しています。舞鶴湾で行われてきたような生態系観測をもっと広域・多地点で実施することで、生態系の振る舞いの理解が進み、生態系保全を効果的に進めることが可能になると考えています。

発表雑誌

Fluctuating interaction network and time-varying stability of a natural fish community

野外の魚類群集における種間相互作用ネットワークの変動と安定性の時間変動

Nature (ネイチャー)

潮 雅之 (京都大学/科学技術振興機構) ・ Chih-hao Hsieh (国立台湾大学, 台湾) ・ 益田 玲爾 (京都大学) ・ Ethan R. Deyle (スクリプス海洋研究所, 米国) ・ Hao Ye (スクリプス海洋研究所, 米国) ・ Chun-Wei Chang (中央研究院, 台湾) ・ George Sugihara (スクリプス海洋研究所, 米国) ・ 近藤 倫生 (龍谷大学)

※所属は論文掲載時のもの。

参考図

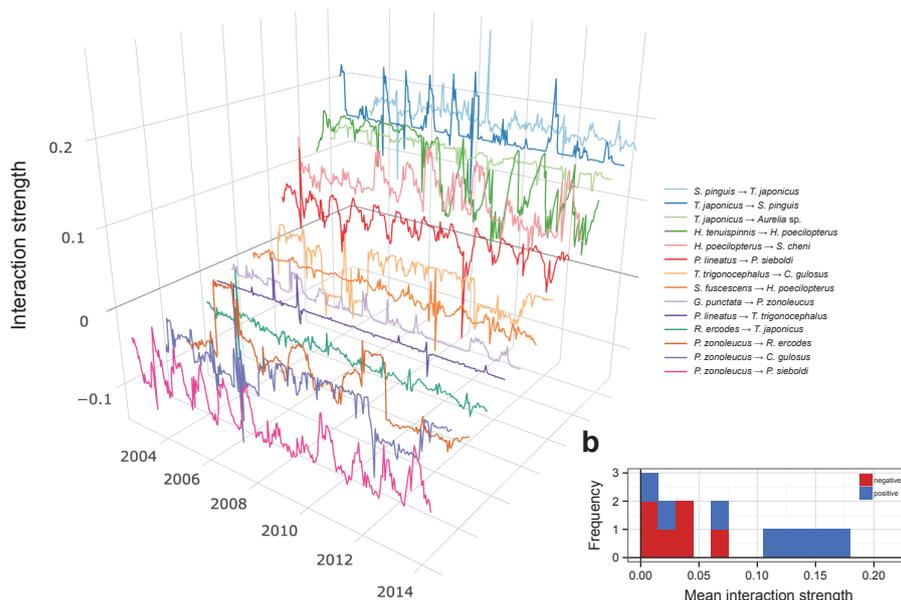


図2. 変動する種間相互作用。(a) 個体数変動データから明らかになった生物種間の14の関係性の時間変動。横軸は時間を表し、縦軸は効果の強さ(interaction strength)を表す。正の値は相手を増やす効果、負の値は相手を減らす効果を表す。(b) 異なる強度(mean interaction strength)の種間相互作用の頻度分布。Natureより。

用語説明

注1) 生物群集

生態系には様々な種類の生物と一緒に暮らして（共存して）います。特定の生息地で共存している生物種の集まりのことを生物群集と呼びます。例えば、本研究で注目している舞鶴湾に共存する14種の魚とクラゲは、同じ生物群集に属していると言えます。一般に、同じ生物群集に属する生物種は、捕食-被食関係、互いに助け合う関係、競争関係などの様々な関係性によって、互いの人口動態（個体数変動）に影響をおよぼしあっていると考えられています。捕食-被食関係で言えば、天敵となる生物種の個体数が増えると、被食生物種（餌種）の個体数は減りやすくなります。また、互いに敵対し競争関係にある2種がいれば、片方の生物種の個体数増加はもう一方の生物種の個体数減少につながります。

注2) 安定化の仕組み

生物群集ではある生物が増減すると、その影響を受けて他の生物種も増減することになります。したがって、生物群集は多くの生物種が互いの個体数に影響し、また影響される複雑系だと捉えることができます。多種が相互作用する複雑系は維持が難しいことが理論的に示されていますが、現実には、生態系は複雑であるにもかかわらず長い間維持されています。このことから、生態系には、その状態が大きく変化しないように調節する何らかの仕組み（安定化の仕組み）が備わっているのではないかと考えられてきました。

注3) 潜水調査データ（個体数変動データ）

本研究の舞台となった舞鶴湾は、京都府北部に位置する湾口700m、面積23平方キロ、最大水深20mの小さな湾です。舞鶴湾では、本研究にも参加した益田准教授により、2002年より2週間に一度の潜水調査（1回の潜水調査は約1時間）が欠かさず行われています。岸から10mほど離れた場所（水深1-10m）に幅2m・長さ600mの調査ラインが設けられており、益田准教授は潜水したままこの調査ラインに沿って位置を変え、そこに生息するすべての魚種とその数を記録し続けてきました。本研究はこの長期潜水調査で観察された生物のうち15種の生物に着目し、その時間変動データを解析しました。

注4) 新しく開発した数理的手法

潜水調査データは、個々の生物種の個体数の時間変動（人口動態）を表しています。今回新しく開発した非線形力学理論に基づく数理手法を利用することで、個体数変動の背後に隠された情報を取り出せます。具体的には、（1）生物種間の関係性とその時間変動、（2）生物群集の安定性、そして（3）要素（種数や関係性、生物群集の安定性）間の因果関係を調べることができます。

植物が成長に合わせて葉の形状を変える仕組み

～葉の形を決める遺伝子をイネで発見～

2019年7月31日 生物学科、生命科学研究所 助教（研究特任） 鳥羽 大陽

概要

東北大学、東京大学、東京農業大学の研究者からなる共同研究により、イネにおいて葉の形を調節するマスター制御因子（注1）OsBLADE-ON-PETIOLE（以下、OsBOP）を発見しました。OsBOPの機能解明により、葉の形態が成長に応じて変化する仕組みが初めて明らかになりました。本研究の成果は、新しい品種改良技術の創出につながるものと期待されます。



図1. 幼若期のイネ

左から通常のイネ（野生型）、OsBOP シングル変異体、OsBOP ダブル変異体、OsBOP トリプル変異体

研究内容

1.研究の背景

花を咲かせる植物は、一般的に種子から発芽し、葉を茂らせ、花をつけ、種子を結実するという成長過程を示します。発芽したばかりの幼若な時期に花をつけることはなく、個体の成長が進んで成熟してから花を咲かせるのです。桃栗3年柿8年と言われるように、幼若期の状態が何年も続く植物もあれば、幼若期がわずか数日と短い植物もあります。

植物の幼若期と成熟期では、花をつけられるかどうかだけでなく、様々な特徴が異なります。葉の形の違いもその特徴の一つです。植物にとって、葉は光合成によりエネルギーを生産するための主要な器官であり、どのような形状の葉を作るかは、生存戦略に関わる問題です。これまで、幼若・成熟の異なる成長段階において、葉の形を変える仕組みはわかっていませんでした。

本研究では、イネを研究対象としてその仕組みの解明を目指しました。

イネの葉の形は、先端部の葉身、基部の葉鞘と呼ばれる2つの器官から構成されています。葉身は主に光合成を行う役割を担い、葉鞘は植物体を支持する役割をもっています。イネの成長段階における幼若・成熟期の違いは、葉身と葉鞘の割合の違いとして現れます（図2）。

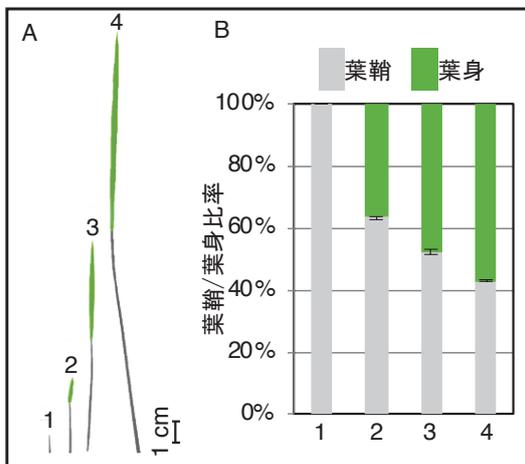


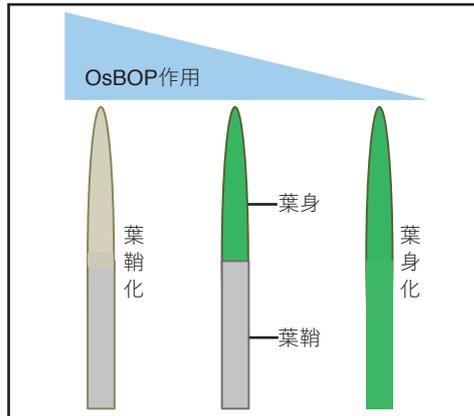
図2. イネ幼若期の葉身/葉鞘割合

A.左から第1,2,3,4葉の形。緑色部分が葉身、灰色部分が葉鞘。
B.葉鞘と葉身の割合

種子から発芽したイネが最初にする1番目の葉(第1葉)は葉身を欠いており、葉鞘のみで構成されています。2番目、3番目、4番目の葉では、葉身が徐々に大きくなり、5番目以降の葉からは成熟期となります。葉身と葉鞘の割合を調節する仕組みは全くわかっていませんでしたので、本研究ではその仕組みの解明から研究に着手しました。

2.研究成果

研究を進めた結果、葉身と葉鞘の割合を調節する3つの遺伝子 OsBOP を発見しました。OsBOP を人為的に過剰発現し、その機能を強めると葉身の形成が抑制され、葉は葉鞘のみから構成されるようになりまし

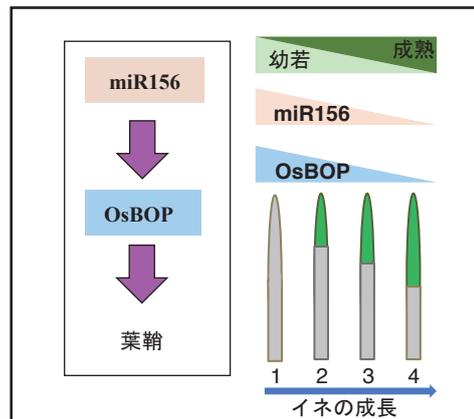


れるようになりました。一方、ゲノム編集^(注2)によって OsBOP の機能を喪失させると、葉鞘の形成が損なわれ、葉は葉身のみから構成されるようになりました。つまり、OsBOP 機能の強弱により、葉身を形成するのか、それとも葉鞘を形成するのかが決まることがわかりました(図3)。

図3. OsBOP は葉身/葉鞘割合を決定する。OsBOP 作用が強いと葉鞘の割合が高くなり(左)、弱いと葉身の割合が高くなる(右)。

さらに、OsBOP の機能する時期と場所を詳細に調べました。OsBOP の発現は、幼若期に強く、成熟期に向かうにつれて弱まることがわかりました。このことから、OsBOP の機能により幼若期の葉の形が決まることが明らかになりました(図4)。

図4. miR156 は OsBOP の発現を制御することで、葉を幼若期の状態にする。



次に、幼若期には OsBOP の発現が強い一方で、成熟期になると弱まる仕組みについて研究を進めました。その結果、幼若期に働く低分子 RNA^(注3) (miR156)が OsBOP の発現を制御することが判明しました。miR156 が働くと OsBOP の発現が強まり、逆に miR156 が働かないと OsBOP の発現が弱まります。以上により、幼若・成熟期で異なる葉の形が制御される仕組みとして、葉の形を調節するマスター制御因子 OsBOP を発見し、幼若期にその機能を強く発現させるメカニズムを明らかにしました。

3.今後の展開

葉身の割合を高めることは、光合成の効率を高め、作物の生産性向上に寄与します。OsBOP の発見は葉身/葉鞘の割合をコントロールする技術の基盤的知見になると考えられます。将来的には、光合成効率を高める品種改良技術の創出につながると期待されます。

生物は進化の中で、様々にその形を変えてきました。植物の葉も例外ではありません。例えば、タケのように地下に茎を伸ばし、地中を成長する植物があります。地下茎植物は、地中を成長す

るために、葉身の形成を積極的に抑える進化を遂げています。今後、葉の形を調節するマスター制御因子 OsBOP の働きを調べることで、地下茎進化の仕組みの理解を目指します。

発表雑誌

この研究は、東北大学生命科学研究科の経塚淳子 教授の研究グループ、東京大学農学生命科学研究科の伊藤純一 准教授の研究グループ、東京農業大学生命科学部の太治輝昭 教授、および同大学生物資源ゲノム解析センターの田中啓介 助教との共同により行われました。研究成果は、Springer Nature (UK)発行の online 科学誌『ネイチャー・コミュニケーションズ』 (*Nature Communications*) において 2019 年 2 月 6 日に掲載されました。

Taiyo Toriba, Hiroki Tokunaga et al. “BLADE-ON-PETIOLE genes temporally and developmentally regulate the sheath to blade ratio of rice leaves” *Nature comm.*, 2019, 10, 619.

東北大学理学部の研究力

編集・発行 東北大学 理学部・理学研究科
〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3
Tel 022-795-6708

E-mail sci-pr@mail.sci.tohoku.ac.jp

2022年3月発行

冊子内の職階・所属表記は研究成果発信時のものになります。